



**ENERJİ VERİMLİ KULLANIMA ÖZEL 3D YONGA ÜSTÜ  
AĞ TASARIMI**

**ENERGY AWARE APPLICATION-SPECIFIC 3D  
NETWORK-ON-CHIP DESIGN**

**ARASH BARZINMEHR**

**DOÇ. DR. SÜLEYMAN TOSUN**

**Tez Danışmanı**

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim dalı için Öngörüldüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2017

ARASH BARZINMEHR' in hazırladığı "Enerji Verimli Kullanıma Özel 3D Yonga Üstü Ağ Tasarımı" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından BİLGİ-SAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI' nda YÜLSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

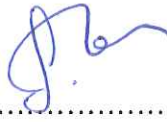
Prof. Dr. Şahin EMRAH

Başkan



Doç. Dr. Süleyman TOSUN

Danışman




Doç. Dr. Özcan ÖZTÜRK

Üye



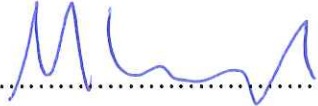
Doç. Dr. Ahmet Burak CAN

Üye



Yrd. Doç. Dr. Mehmet KÖSEOĞLU

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etseniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.

- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi

14/06/2017

  
Arash Barzinmehr

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

04.06.2017

  
ARASH BARZINMEHR

## ÖZET

### ENERJİ VERİMLİ KULLANIMA ÖZEL 3D YONGA ÜSTÜ AĞ TASARIMI

**Arash BARZINMEHR**

**Yüksek Lisans, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Süleyman TOSUN**

**Haziran 2017, 78 sayfa**

Yonga-üstü-Ağ (YüA), yüksek performanslı modern nanometre boyutlarındaki Yonga-üstü-Sistemlerin (YüS) bileşenleri arasındaki yüksek iletişim talebini karşılamak için, ümit verici bir konsept olarak öne sürülmüştür. Üç Boyutlu mikroçipler (3D IC), uzun katman-üstü bağlantıları katmanlar arası kısa dikey Silikon Arası Bağlantılarla (SAB) değiştirerek, gecikme ve enerji tüketimini azalttıklarından popüler hale gelmişlerdir. İki boyutlu YüA'ların sunduğu performanstan daha iyisini elde etmek için, YüA'ların 3D teknolojisiyle birleştirilmesi daha iyi bir çözüm gibi görünmektedir. Enerji ve iletişim farkındalıklı 2D-YüA'ları tasarlamak için iyi sentezleme yöntemleri mevcut olmasına rağmen, bu yöntemlerin 3D alternatiflerine halen ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada 3D-YüA'lar için enerji-farkındalıklı uygulamaya-ölgü bir topoloji oluşturma yöntemi önerilmiştir. Sunulan yöntem, dinamik enerji tüketimini en aza indirmek için uygulamanın düğümlerini YüA mimarisinin katmanları arasında bölümleyen sezgisel eniyileme algoritmasına dayanmaktadır. Sunulan 3D yöntem, birçok YüA karşılaştırmalı değerlendirmeye uygulanarak, 2D alternatife karşı test edilmiştir. Simülasyon sonuçları, sunulan yaklaşımın, enerji ve alan açısından 2D eşdeğerinden daha iyi olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Yonga-üstü-Sistem (YüS); Yonga-üstü-Ağ (YüA); 3D-YüA; uygulamaya ölgü YüA; Topoloji; 3D mikroçipler; enerji tüketimi.

## **ABSTRACT**

### **ENERGY AWARE APPLICATION-SPECIFIC 3D NETWORK-ON-CHIP DESIGN**

**Arash BARZINMEHR**

**Master of Science, Department of Computer Science**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Süleyman Tosun**

**June 2017, 78 pages**

Network-on-Chip (NoC) is a promising approach for supporting a heavy communication demand between all parts of high-performance modern nanoscale System-on-Chips (SoCs). Three-dimensional (3D) IC integration has become popular by reducing latency and energy consumption due to replacing long global interconnects with short vertical through silicon via (TSV) interconnects between different dies. Combining NoCs with 3D technology seems a good choice for achieving better performances than 2D. Although there exist good synthesis methods for designing energy- and communication-aware 2D-NoCs, there is still needs for 3D alternative. In this paper an energy-aware application-specific topology generation method for 3D-NoCs is proposed. This method is based on a heuristic optimization algorithm that partitions the application nodes among layers of the NoC architecture for an attempt to minimize the dynamic energy consumption. Proposed 3D method tested against a 2D alternative through several NoC benchmarks. Simulation results show that our approach outperforms its 2D counterpart in terms of energy and area.

**Keywords:** System-on-Chip (SoC); Network-on-chip (NoC); 3D-NoC; application specific NoC; Topology; 3D integrated circuits; energy consumption.

## TEŞEKKÜR

Tez konusu seçiminde ve tez çalışmamın her aşamasında değerli katkı ve eleőtirileriyle beni yönlendiren Sayın hocam Doç. Dr. Süleyman TOSUN'a; maddi ve manevi katkı ve desteklerinden dolayı Anne ve Baba'ma sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Manevi katkılarından dolayı, arkadaşlarım, İman Rezazadeh Khiavi ve Hamed Porkar teőekkürlerimi sunarım.

Bu tez alıőması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araőtırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 112E360 numaralı 1001 projesi kapsamında sürdürölmüőtür.



# İÇİNDEKİLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| ÖZET .....  | i            |
| ABSTRACT .....  | ii           |
| TEŞEKKÜR .....  | iii          |
| İÇİNDEKİLER.....  | iv           |
| ÇİZELGELER.....   | vi           |
| ŞEKİLLER .....  | vii          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                           | ix           |
| 1. GİRİŞ .....  | 1            |
| 1.1. Motivasyon .....                                   | 1            |
| 1.2. Tezin Yapısı .....                                 | 4            |
| 2. LİTERATÜR ÖZETİ .....                                | 5            |
| 3. TANIMLAR.....  | 7            |
| 3.1. Giriş .....  | 7            |
| 3.2. Yonga üstü Sistem (YüS) .....                      | 7            |
| 3.3. Yonga üstü Ağ .....                                | 7            |
| 3.4. Düzenli ve Düzensiz YüA .....                      | 8            |
| 3.5. 3D Yongalar.....                                   | 8            |
| 3.6. Silikon Arası Bağlantılar .....                    | 9            |
| 3.7. Yönlendiriciler .....                              | 9            |
| 4. MODEL.....   | 11           |
| 4.1. Enerji Modeli .....                                | 11           |
| 4.2. Alan Modeli .....                                  | 13           |
| 5. TOPGEN 3D YÖNTEMİ.....                               | 14           |
| 5.1. Problem Tanımı .....                               | 14           |
| 5.2. TopGen 3D Yöntemi .....                            | 18           |
| 5.2.1. Düğüm Kümeleme (Genel Açıklama) .....            | 19           |
| 5.2.2. Düğüm Kümeleme (Algoritma).....                  | 21           |
| 5.2.3. Topoloji Oluşturma Algoritması.....              | 25           |
| 5.2.4. Topoloji Oluşturma Algoritmasının Detayları..... | 26           |
| 6. DENEYSEL SONUÇLAR.....                               | 31           |

|   |    |
|---|----|
| 6.1.1. Örnek olay incelemesi .....        | 31 |
| 6.1.2. Sonuçları ve Karşılaştırmalar..... | 38 |
| 7. SONUÇ .....                            | 46 |
| KAYNAKLAR.....                            | 47 |
| 8. EKLER .....                            | 51 |

## ÇİZELGELER

|   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|---|---------------------|
| Çizelge 6.1. Mp3 Enc aday küme listesi .....  | 32                  |
| Çizelge 6.2. Mp3 Enc aday küme listesi, ilk kümenin karşılaştırmalarından sonra.....                  | 33                  |
| Çizelge 6.3. Mp3 enc aday küme listesi, kümeler arası ortak düğümler elendikten sonra .               | 34                  |
| Çizelge 6.4. Mp3 enc Düğüm kümeleme algoritması çıktısı eşdeğer küme listesi .....                    | 35                  |
| Çizelge 6.5. Çizelge 6.4'te verilen kümelerinin yerleştirme öncelikleri .....                         | 37                  |
| Çizelge 6.6. Farklı adım sayısına göre katman-üstü bağlantıların tükettikleri enerji miktarları ..... | 39                  |
| Çizelge 6.7. Farklı kapı sayısına göre yönlendiricilerin tükettikleri enerji miktarları .....         | 39                  |
| Çizelge 6.8. TopGen 3D ve 2D sürümü kümeler arası iletişim karşılaştırması .....                      | 40                  |
| Çizelge 6.9. TopGen 3D (2 katmanlı) ve 2D sürümü çeşitli uygulamalar üzerine karşılaştırması.....     | 41                  |

## ŞEKİLLER

|   | <u>Sayfa</u> |
|---|--------------|
| Şekil 1.1. Örnek bir 2D yonganın 4 katmanlı 3D bir yonga bölünmüş hali.....   | 2            |
| Şekil 1.2.(a) Düzenli YüA örneği. (b) Düzensiz YüA topoloji örneği.....   | 3            |
| Şekil 5.1. Mp3 Enc uygulamasının iletişim çizgesi .....   | 15           |
| Şekil 5.2. Mp3 Enc için oluşturulan topoloji çizgesi.....   | 16           |
| Şekil 5.3. Mp3 Enc uygulamasının Şekil 5.2'deki topolojiye eşlenmiş hali.....   | 17           |
| Şekil 5.4. Şekil 5.3'te verilen topolojinin iki katmanlı 3D yongaya bölünmüş hali .....                                     | 17           |
| Şekil 5.5. TopGen 3D yönteminin akış diyagramı .....  | 19           |
| Şekil 6.1. Mp3 enc için 5-kapılı yönlendiriciler kullanılarak oluşturulan küme çizgesi.....                                 | 36           |
| Şekil 6.2. Mp3 enc uygulamasının topoloji oluşturma aşaması çıktısı son topolojisi.....                                     | 38           |
| Şekil 6.3. TopGen 3D ve 2D sürümünün alan karşılaştırması .....   | 42           |
| Şekil 6.4. TopGen 3D ve 2D sürümünün enerji tüketim karşılaştırması.....  | 43           |
| Şekil 6.5. TopGen 3D ve 2D sürümünün iletişim maliyeti karşılaştırması.....   | 44           |
| Şekil 6.6. TopGen 3D ve 2D sürümü enerji tüketim karşılaştırmaları, SAB'ların farklı enerji tüketim miktarlarına göre ..... | 45           |
| Şekil 8.1. VOPD_12 uygulamasının iletişim çizgesi .....   | 51           |
| Şekil 8.2. VOPD_12 uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....                             | 51           |
| Şekil 8.3. VOPD_12 uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....                          | 52           |
| Şekil 8.4. VOPD_12 uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi.....   | 52           |
| Şekil 8.5. VOPD_16 uygulamasının iletişim çizgesi .....   | 53           |
| Şekil 8.6. VOPD_16 uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....                             | 53           |
| Şekil 8.7. VOPD_16 uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....                          | 54           |
| Şekil 8.8. VOPD_16 uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi.....   | 54           |
| Şekil 8.9. 263mp3enc uygulamasının iletişim çizgesi.....  | 55           |
| Şekil 8.10. 263mp3enc uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....                          | 55           |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 8.11. 263mp3enc uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali ..... | 56 |
| Şekil 8.12. 263mp3enc uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi .....                     | 56 |
| Şekil 8.13. 263mp3dec uygulamasının iletişim çizgesi.....   | 57 |
| Şekil 8.14. 263mp3dec uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....    | 57 |
| Şekil 8.15. 263mp3dec uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali ..... | 58 |
| Şekil 8.16. 263mp3dec uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi .....                     | 58 |
| Şekil 8.17. Mp3 enc uygulamasının iletişim çizgesi .....  | 59 |
| Şekil 8.18. Mp3 enc uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....      | 59 |
| Şekil 8.19. Mp3 enc uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....   | 60 |
| Şekil 8.20. Mp3 enc uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi .....                       | 60 |
| Şekil 8.21. D26_media uygulamasının iletişim çizgesi.....   | 61 |
| Şekil 8.22. D26_media uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....    | 61 |
| Şekil 8.23. D26_media uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali ..... | 62 |
| Şekil 8.24. D26_media uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi .....                     | 62 |
| Şekil 8.25. D38_tVOPD uygulamasının iletişim çizgesi .....  | 63 |
| Şekil 8.26. D38_tVOPD uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali .....    | 63 |
| Şekil 8.27. D38_tVOPD uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali ..... | 64 |
| Şekil 8.28. D38_tVOPD uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi.....                      | 64 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

|          |            |
|----------|------------|
| $\Sigma$ | Toplam     |
| Pj       | Pico joule |
| $\mu m$  | Mikrometre |

### Kısaltmalar

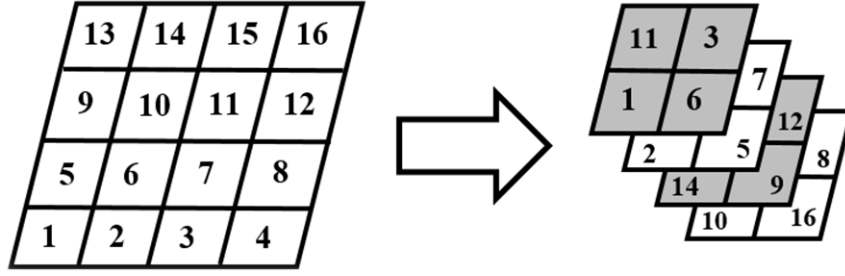
|             |                                   |
|-------------|-----------------------------------|
| TSV         | Through Silicon Via               |
| NoC         | Network on Chip                   |
| SoC         | System on Chip                    |
| NI          | Network Interface                 |
| VOPD        | Video Object Plane Decoder        |
| tVOPD       | Triple Video Object Plane Decoder |
| 263 Mp3 Enc | 263 Mp3 Encoder                   |
| 263 Mp3 Dec | 263 Mp3 Decoder                   |
| Mp3 Enc     | Mp3 Encoder                       |
| 3D          | Three Dimensional                 |
| 2D          | Two Dimensional                   |
| YüA         | Yonga-üstü-Ağ                     |
| YüS         | Yonga-üstü-Sistem                 |
| İÇ          | İletişim Çizgesi                  |
| TÇ          | Topoloji Çizgesi                  |
| KÇ          | Küme Çizgesi                      |
| Kbits/s     | Kilobits per second               |
| SAB         | Silikon Arası Bağlantı            |

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Motivasyon

Son senelerde, teknolojinin ilerlemesiyle transistörlerin boyutları küçülerek, bir sistemin çalışması için gerekli olan birçok bileşeni, Yonga üstü Sistem (YüS) adlandırılan tek bir yonga üzerine yerleştirilmek mümkün olmuştur. YüS'lerin bileşen sayısında artış meydana gelmesiyle beraber, geleneksel iletişim altyapıları (Ortak yol, Noktadan Noktaya vd.) bu bileşenlerin aralarındaki ağır iletişim yükünü karşılamakta zorluk yaşayarak, iletişimde gecikmeye ve yüksek enerji tüketimine yol açmışlardır. Ayrıca iletişim bağlantılarının boyutları transistörlerin boyutlarıyla aynı ölçekte küçülmemesi, bağlantıların daha fazla yer kapsamalarına neden olarak, tasarımcıların yonga bileşenlerinden ziyade bağlantılar üzerinde odaklanmasına sebep olmuştur [1]. Günümüzün yüksek performanslı yongalarındaki iletişim ve bağlantı problemleri, bilim adamlarını yeni, esnek ve paralel bir iletişim altyapı olan Yonga üstü Ağ (YüA) [2]–[5] altyapısını öne sürmeye zorlamıştır.

YüA, yüksek performanslı modern YüS'lerin bileşenlerinin aralarındaki yüksek veri aktarım miktarını karşılamak için ümit verici bir konsept olarak düşünülmektedir. YüA iletişim altyapısı, geleneksel bilgisayarlar arası ağ konseptini yongalara taşıyarak, Paket Anahtarlama ağlarının avantajlarından faydalanmayı sağlamaktadır [6]. YüA'da, yonga bileşenleri birbiriyle doğrudan iletişim kurmak yerine, ağ ara yüzlerini kullanarak yönlendiricilere bağlanıp ve ağ üzerinden iletişim kurmaktadırlar. Bu altyapı, Ortak Yol gibi geleneksel iletişim altyapılarına karşı daha fazla esneklik ve paralellik sağlayarak, daha da az enerji tüketimine sebebiyet vermektedir [7]. YüA, yönlendiriciler ve daha kısa bağlantılardan yararlanarak yonga üzerinde paralel bir iletişim altyapısı sağlayıp, tasarım amaçlarına ulaşmakta kolaylık sağlasa da, gittikçe artan performans talepleri ve yoğun yonga ihtiyaçlarını karşılamak için, 2D mimarisinden 3D mimariye geçmek kaçınılmaz hale gelmiştir.



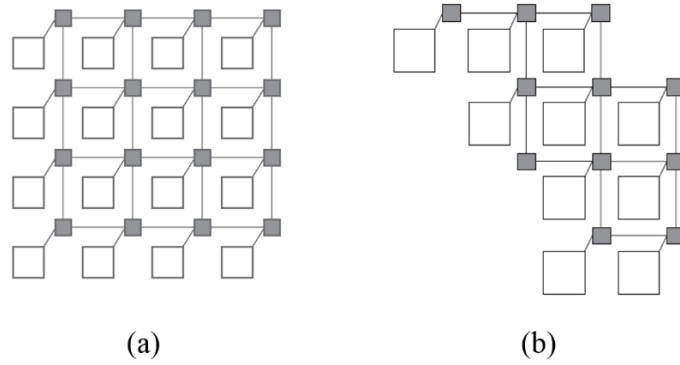
Şekil 1.1. Örnek bir 2D yonganın 4 katmanlı 3D bir yonga bölünmüş hali

Son yıllarda 3D mikroçiplerin üretimi ve kullanımı popüler hale gelerek, bant genişliği kısıtlamalarına karşı ümit verici bir çözüm olarak kabul edilmiştir. Şekil 1.1’de görüldüğü üzere 3D yongaların mimarisinde, yonga katmanının daha küçük kesimlere bölünerek yığın halinde birbiri üstüne yerleştirilmesi ve katmanlar arası iletişim için kısa dikey Silikon-Arası Bağlantılar (SAB) kullanılması, iletişimden doğan enerji tüketimini ve gecikmeyi önemli ölçüde azaltabilmektedir [8]. 3D yongaların başka bir avantajıysa, teknoloji uyumsuzluğundan dolayı, önceden tek bir yonganın üzerine yerleştirilmeleri mümkün olmayan işlemciler, G/Ç aygıtları ve hafıza gibi farklı teknolojilere sahip bileşenleri esnek bir şekilde tek bir yonganın üzerine yerleştirilmelerini mümkün kılmalarıdır [1]. Kısacası 3D yongaların en önemli avantajları, bağlantıları kısılması sonucu meydana gelen enerji tasarrufu ve yonga katmanının birkaç daha küçük katmana bölünmesinden sonuçlanan alan küçülmesidir [9]. YüA altyapısını 3D yonga teknolojisiyle birleştirmek, 2D-YüA’ların sundukları performanstan bile daha iyisini elde etmek için, iyi bir konsept olarak görünmektedir. Bu iki teknolojinin birleştirilmesi yolunda yaşanan en önemli problemlerden biri ise, 3D yongalarda özellikle farklı kısıtlamalar altında en iyi topolojiyi oluşturup tasarlanmanın, 2D yongalarda olduğundan çok daha zor olmasıdır.

YüA’lar genellikle düzenli veya düzensiz topolojiler üzerine kurulmaktadırlar. Örgü, Simit ve Ağaçlar gibi Şekil 1.2.a’da örneği verilen düzenli topolojiler, tekrar kullanılabilir olmaları ve tasarım sürelerinin az olmalarından dolayı hem 2D, hem de 3D yongalarda en çok tercih edilen topolojilerden sayılmaktadırlar [10]. Diğer yandan Şekil 1.2.b’de örneği verilen düzensiz veya uygulamaya özgü topolojiler, özellikle her uygulama için özel olarak tasarlandıklarından, tasarım amaçlarını rakipleri olan düzenli topolojilerden daha iyi



optimize etmektedirler. Ancak mevcut uygulamaya-özü topoloji oluşturma yöntemleri, tasarım amaçlarını karşılayan iyi topolojiler oluşturmak için yeterince olgun hale gelmemişlerdir. Modern YüS'lerin birçoğunun düzensiz bileşenleri olduğundan, bu çalışmada da düzensiz topolojiler mimarisi üzerine odaklanmıştır. Yongalardaki dinamik enerji tüketiminin kaynağı, bileşenler ve bileşenlerin aralarındaki veri iletişimi olduğundan, ayrıca enerji tüketiminin de iletişimle direk olarak orantılı olduğundan, dinamik enerji tüketimini en aza indirmek için bileşenlerin aralarındaki veri iletişimini azaltmak, mantıklı çözümlerden biri olarak görülmektedir.



şekil 1.2.(a) Düzenli YüA örneği. (b) Düzensiz YüA topoloji örneği.

Bu çalışmada, bağlantılar ve ağ bileşenlerinin enerji tüketimini azaltmaya odaklanarak, 3D-YüA'lar için enerji farkındalıklı uygulamaya özü topolojiler oluşturarak, TopGen 3D adlı, iki aşamalı bir yöntem sunulmuştur. Yöntemin ilk aşamasında, uygulamaya ait bileşenlerin iletişiminden doğan dinamik enerji tüketimini en aza indirmeye çalışan, özel bir topoloji oluşturulmaktadır. İkinci aşamadaysa, son tasarımın enerji tüketimini daha da azaltmak için, bileşenlerin bağlandıkları yönlendiricilerin aralarındaki iletişim ve bileşenlerin alan bilgileri göz önüne alınarak, ilk aşamada oluşturulan topoloji, 3D yonganın farklı katmanları arasında bölünmektedir. Yöntemin ikinci aşamasındaki algoritma, farklı sayıda katmana sahip 3D yongalar için çalıştırılarak, her uygulama için enerji tüketim miktarı en az olan ideal sayıdaki topoloji seçilmeye çalışılır. Bu çalışmada, daha önce yapılan benzer çalışmalardan farklı olarak, oluşturulacak olan topolojiyi bileşenlerin ilk baştaki dizilişine kısıtlamamak için, bileşenlerin dizilişini belirlemek son aşamaya bırakılmıştır. Sunulan 3D-YüA topoloji oluşturma yöntemi, eşdeğeri olan 2D sürümüyle [11] kıyaslanmıştır. Karşılaştırmalar için normal hayatta kullanılan, farklı boyutlara sahip gerçekçi uygulamalar kullanılmıştır.

Simülasyon sonuçlarına göre, iletişim miktarı, enerji tüketimi ve alan kapsamında önemli derecede azalma meydana gelmiştir.

## **1.2. Tezin Yapısı**

Sunulan tez 6 bölüm olarak biçimlendirilmiştir. İkinci bölümde daha önce yapılan benzer çalışmalardan, burada sunulan çalışmayla farklılıklarından ve yapılan iyileştirmelerden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, tez de kullanılan önemli kavramlar kısaca tanıtılmıştır. Bölüm 4'te ve 5'te sırasıyla, kullanılan modeller ve sunulan yöntem anlatılmıştır. Bölüm 6'da simülasyon sonuçları ve kıyaslamalar ve son olarak Bölüm 7'de sonuç yer almaktadırlar.

## 2. LİTERATÜR ÖZETİ

3D-YüA, son zamanlardaki elektronik devreler ve YüS'lerin tasarım alanında yapılan birçok çalışmanın konusu olmuştur. 3D yonga ve YüA tasarım alanlarında literatürde birçok çalışmaya [12]–[18] rastlamak mümkündür. Yıllar içinde taşınabilir cihazların artması, enerji tasarrufunun önemini daha da öne çıkarmış ve enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmaların artmasıyla sonuçlanmıştır. Bu çalışmada olduğu gibi, YüA'ların tasarım alanında yapılan araştırmaların büyük kısmı, dinamik enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalardır.

3D-YüA'lar için topoloji oluşturma amaçlı çalışmaların çoğunda [12]–[16], [18], yonga ve ağ bileşenlerin yonga üzerindeki dizilişlerine de ayrıca odaklanmıştır. Bunlardan bazıları [12], [13], [15], [16] topoloji oluşturma aşamasını bileşenlerin yerlerinin belli olmasından sonraya bırakmışlardır. Genel olarak, bileşenlerinin dizilişinin ilk başta yapılma nedeni, yönlendiriciler ve ağ ara yüzleri gibi ağ bileşenlerinin, sistem bileşenleri kadar alan kapsamadığı ve diziliş esnasında etkileri az olduğu düşüncesine dayanmaktadır. Hâlbuki 3D-YüA'larda kullanılan yönlendiricinin alanı, 2D sürümlerde olduğundan daha fazladır ayrıca SAB bağlantıları da alan kapsamaktadırlar, buna göre de diziliş esnasında ağ bileşenlerinin alanlarının da hesaba katılmasına gerek vardır. Sonuç olarak 3D-YüA'ların tasarımında, yonga bileşenlerinin dizilişini son aşamada veya tasarım esnasında yapılması daha mantıklı gözükmektedir. Yonga bileşenlerinin dizilişini ilk başta yapan yöntemler sonucunda oluşturulan topolojiler, zaman zaman iyi performans değerleri elde etseler de, oluşturulan topolojiler, YüS bileşenlerinin başlangıçtaki yerlerinin etkisi altında kalmışlardır. Sadece geçmişte yapılan birkaç çalışmada [14], [17], bileşenlerin dizilişi, topoloji oluşturma aşaması esnasında veya sonrasında yapılmıştır, ancak bu çalışmalarda sunulan yöntemlerin zaman karmaşıklığı çok yüksektir.

Zhong, Chen vd. [14] enerji farkındalıklı 3D-YüA tasarımı için dört aşamadan oluşan bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde yonga bileşenlerinin dizilişi, SAB'lar yerleştirilmeden önce ve sonra, yani toplamda iki defa yapılmıştır. Ayrıca Tamsayı Doğrusal Programlamaya dayalı bir algoritma, yönlendiricilerin ve ağ ara yüzlerinin yerlerini belirlemek için kullanılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajları ise algoritmasının zaman karmaşıklığının

fazla olması, yonga üzerindeki bileşenlerin dizilişinin iki defa yapılması ve katmanların kendi dizilişine önem verilmemesidir. Murali, Benini vd. [12] 3D-YüA tasarımı için bir araç öne sürmüşlerdir. Bu araç daha önce 2D-YüA'ların tasarımı için sundukları aracın 3D'ye uyarlanmış sürümüdür. Bileşenlerin dizilişinin başlangıçta yapıp girdi olarak algoritmaya verildiği bu yöntemde, 3D yonga üzerindeki bileşenlerin dizilişi, enerji tüketimi ve iletişim gecikmesi en az olacak şekilde yapılmaktadır. Bu yöntemin dezavantajlarından biri, ideal yönlendirici sayısının belirlenmesi için birden bileşen sayısına kadar artabilen bir döngü kullanılmasıdır.

Yan ve Lin [16] 3D-YüA tasarımı için bileşenlerin dizilişinin girdi olarak verildiği bir yöntem sunmuşlardır. Zhou, Yuh vd. [18] "simulated allocation" yöntemine dayalı, enerji farkındalıklı 3D-YüA için topoloji oluşturma yöntemi sunmuşlardır, bu çalışmada bileşenlerin dizilişlerinin başlangıçta yapılmasından sonra, ağ bileşenleri eklenerek topoloji oluşturulduktan sonra, bir kez daha bileşenlerin dizilişi yapılmaktadır. Aktürk ve Öztürk [17] yayınladıkları çalışmada bileşenlerin farklı katmanlara yerleştirilebileceği Tamsayı Doğrusal Programlama yöntemine dayalı enerji aktarımlı düzensiz 3D-YüA tasarımı için bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntemdeyse, toplam dinamik enerjiyi azaltmak için, veri iletişiminden doğan enerji tüketimine odaklanmak olmuştur. Bu çalışmanın dezavantajı, zaman karmaşıklığı fazla olan bir yöntem üzerine kurulması olmuştur.

Bu çalışmada sunulan yöntemde, enerji farkındalıklı 3D-YüA tasarımı için, döngüye dayalı karmaşıklığı fazla olmayan bir yöntem sunulmuştur. Ayrıca oluşturulacak olan topolojileri bileşenlerin başlangıçtaki yerlerine kısıtlamamak için, bileşenlerin dizilişi bir defaya mahsus olarak, son aşamaya bırakılmıştır. Bu yöntem, enerji farkındalıklı 2D-YüA tasarım yöntemine [11] dayanmaktadır, ancak yöntemin genel performansını artırmak için, önemli değişikliklere maruz kalmıştır. Önerilen yöntemin etkinliği, önceki çalışmamıza karşı test edilerek ispatlanmıştır.

## 3. TANIMLAR

### 3.1. Giriş

Bu bölümde, sunulan çalışmada kullanılan önemli tanımların kısa özetlerine ve özelliklerine odaklanmıştır. YüS, 3D yonga, YüA ve çeşitleri söz konusu olan bu tanımlardan bazılarıdır.

### 3.2. Yonga üstü Sistem (YüS)

“Moore” yasasına göre yaklaşık olarak her iki senede bir yongaların üzerindeki transistör sayısı iki katına çıkmaktadır. Transistör boyutlarının küçülmesi, daha fazla transistörü aynı katmana yerleştirmek ile sonuçlanarak birden fazla bileşeni aynı katmana yerleştirmek için gereken alanı sağlamıştır. Cep telefonları gibi birçok mobil aygıtın yaygın hale gelmesiyle beraber bu aygıtların enerji tüketimini azaltmaya yönelik çalışmalar artmıştır. Enerji tasarrufu için önerilerin yöntemlerden biri ise iletişimin neden olduğu enerji tüketimini azaltmak olmuştur. Sistemlerin bileşenlerinin aralarındaki iletişim miktarını azaltmak için, hafıza ve işlemci gibi bir sistemin çalışması için gerekli olan bileşenleri tek bir yonga üzerine yerleştirmek bu bileşenlerin birbirine yakın ve aralarındaki bağlantıların daha kısa olmasına neden olmaktadır. Ortak yol gibi bir iletişim altyapısını kullanarak birbiriyle iletişimde olan sistem bileşenlerinin üzerinde toplandıkları bu yongalar, Yonga üstü Sistem (YüS) [19]–[21] adlandırılmıştır. YüS’lerin enerji tüketimleri az olduğundan, cep telefonları, mobil aygıtlar ve gömülü sistemler gibi bataryaya bağımlı aygıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

### 3.3. Yonga üstü Ağ

Son yıllarda sistemlerin gelişmesi ve çok çekirdekli işlemcilerin artmasıyla beraber, YüS’lerin bileşenlerinin sayısı daha da artmıştır. Bu bileşenlerin artması, aralarındaki bağlantıların da üssel olarak artmasına neden olmuştur. Noktadan Noktaya ve Ortak yol gibi geleneksel iletişim altyapıları, bileşenler arasındaki yüksek iletişim talebi karşısında çaresiz kalarak iletişimde gecikmeye, fazla enerji tüketimine ve performansın düşüklüğüne yol açmışlardır [22]. Yonga-üstü-Ağ (YüA) iletişim altyapısı [5], yonga bileşenlerinin

arasındaki ağır veri aktarımını karşılamak için öne sürülmüştür. YüA, bilgisayarlar arası ağ konseptini yongalara taşıyarak paket anahtarlama ağlarının avantajlarından yararlanmayı sağlamıştır. Paket anahtarlama ağlarında kaynak ve hedef düğümleri arasında veri iletişimi için adanmış bir bağlantı kullanılmaz iken, paketler halindeki veriler farklı rotalar üzerinden hedefe geçiş yapabilirler, böylece daha az bağlantı kullanarak, daha verimli bir iletişim sağlamaktadırlar. YüA'da, uygulamaya ait düğümler (bileşenler), yönlendiricileri kullanarak birbiriyle ağ üzerinden iletişim kurmaya çalışmaktadırlar. Bu iletişim altyapısı, diğer altyapılara göre daha verimli bir iletişim sağlayarak, ağır iletişim yükünü karşılamakta zorlanmayarak, iletişimde yaşanan gecikmeyi ve enerji tüketimini azaltabilmektedir. Bu altyapının en önemli dezavantajıysa, yüksek performanslı YüA için topoloji oluşturma işleminin zaman alıcı ve karmaşık yöntemler gerektirmesidir.

### **3.4. Düzenli ve Düzensiz YüA**

YüA'lar düzenli ve düzensiz (uygulamaya özgü) topoloji üzerine kurulduklarından, araştırmacılar da genellikle onları bu iki türe ayırmaktadırlar. Mesh ve Torus topolojileri düzenli YüA'larda kullanılan en yaygın topolojilerden sayılırlar [23]. Düzenli YüA'lar, genel olarak bileşenleri homojen olan YüS'lerde tercih edilmektedirler. Düzenli YüA'ların tasarımları kolay, hızlı ve az maliyeti olsa da, her uygulamanın farklı gereksinimleri olduğundan, en yüksek performansı elde etmek için o uygulamaya özgü olan düzensiz topolojiden yararlanmak gerekmektedir. Düzenli topolojilerin aksine, düzensiz topolojiye dayalı YüA'ların tasarımı bir o kadar zor ve zaman alıcıdır [24]. Modern YüS'lere ait bileşenlerinin heterojen olması nedeniyle, bu sistemlerin düzensiz topolojilere dayalı altyapılar üzerine kurulmaları daha uygundur.

### **3.5. 3D Yongalar**

Son yıllarda paralel işlemcilerin popülerleşmesi, yongaların bileşenlerinin artmasına yol açarak, yongaların alanlarının büyümesine, bileşenler arası bağlantılarının fazla ve uzun olmasına ve enerji tüketiminin artmasına neden olmuştur. Bahsedilen problemleri aradan kaldırmak için son zamanlarda yongaların mimarisinde devrim yaratan 3D yongalar öne sürülmüşlerdir. 3D yongalar [25]–[27] geleneksel tek katmana sahip yongaların daha küçük katmanlara bölünerek birbiri üstüne yığın halinde yerleştirilmesinden oluşmaktadırlar. Bu

3D yongalarda katmanlar arası iletişimi sağlamak için dikey bağlantılar kullanılmaktadırlar. Bu dikey bağlantılar katmanlar arası asansörler olarak farz edilebilirler. 3D yongalarda katmanlar arası bağlantılar, katman-üstü bağlantılardan çok daha kısa olduğundan, iletişimden doğan enerji tüketiminde önemli ölçüde azalma meydana gelmektedir [28]. Bu yongaların bir diğer avantajıysa, yonga katmanının daha küçük katmanlara bölünmesinden sonuçlanan alan küçülmesidir. Bu güne kadar katmanlar arası bağlantıların mimarisi için kablolu ve kablosuz farklı birçok model öne sürülmüştür. 3D yongalarda en yaygın kullanılan bağlantı teknolojisi, Silikon Arası Bağlantılar (SAB) olduğundan [29], bu çalışmada sunulan yöntemde de bu teknolojiye odaklanmıştır.

### **3.6. Silikon Arası Bağlantılar**

Silikon Arası Bağlantılar [29], [30], 3D yongaların silikon katmanları arasındaki iletişimi sağlamak amaçlı kullanılan dikey bağlantılardır. Katmanların arasındaki köprüler veya asansörler olarak farz edilebilen bu bağlantıların uzunluğu genellikle 5-50  $\mu m$  arasındadır [31]. SAB'ların avantajları, katman-üstü bağlantılara kıyas çok daha kısa olduklarından dolayı hızlı ve daha az enerji tükettikleridir, dezavantajlarıysa üretimlerinin zor ve maliyetli olmasıdır. Bu bağlantıların alan kapsadığı ve yonga sıcaklığını arttırdıklarından, sayıları dikkat ile belirlenmesi gerekmektedir. SAB'lar bütün katmanların arasında kurulabilmektedirler ancak komşu olmayan katmanların arasında kurulmaları için aradaki katmanlarda tünel olarak farz edilebilen makrolara gerek duyulmaktadır. Makroların katmanlara yerleştirilmeleri zor ve maliyetli olduğundan [32], [33] ayrıca ilaveden alan kapsadıkları için birçok çalışmada olduğu gibi sunulan çalışmada da SAB'ların sadece komşu katmanlar arasında kurulması farz edilmiştir.

### **3.7. Yönlendiriciler**

Yönlendiriciler, YüA ve her türlü paket anahtarlama ağının olmazsa olmaz parçası olarak bilinmektedirler. Paket anahtarlama ağlarında düğümlerin arasında adanmış bağlantılar olmadığından düğümler yönlendiricileri kullanarak birbiriyle iletişim kurmaktadır. Yönlendiriciler, paket halindeki verilerin, kaynak düğümden hedef düğüme hangi rota üzerinden gitmesinden sorumludurlar. 3D-YüA'larda kullanılmak üzere farklı mimarilere sahip yönlendiriciler öne sürülmüştür [34]–[38]. 3D-YüA'lardaysa, kullanılması en çok

tercih edilen yönlendirici mimarisi ise, 2D-YüA'larda kullanılan ve basit bir mimariye sahip 5-kapılı yönlendiriciye yukarı ve aşağı katman bağlantıları için iki kapının ilave edildiği mimari modelidir [39]. 3D-YüA'larda kullanılmak üzere yüksek performanslı ve karmaşık yönlendirici mimarilerinin öne sürülmesine rağmen, halen bu yönlendiricilerin mimarisi tartışma konusudur ve bir mimari üzerinde anlaşılmaya varılmamıştır.

### **3D Yonga üstü Ağlar**

Uygulamaların daha karmaşık hale gelmesiyle birlikte çok çekirdekli işlemciler yaygın hale gelmişlerdir. YüS'lerin bileşenlerinin artması bu hızda devam etseler, YüA'lar bile bu bileşenlerin arasındaki iletişimi karşılamakta zorlanacaklardır. İleriki yıllardaki modern ve belki yüzlerce bileşenden oluşacak olan YüS'lerin iletişim gereksinimlerini karşılamak için YüA ve 3D yonga teknolojisi birleştirilerek, 3D-YüA öne sürülmüştür [40]–[42]. 3D-YüA, bu iki teknolojinin avantajlarından aynı yerde yararlanmayı sağlamaktadır [43]. Bir taraftan YüA altyapısı verimli ve paralel bir iletişim altyapısı sağlarken diğer taraftan 3D yonga mimarisi bağlantıları kısaltmaya yardımcı olmaktadır. Gelecekteki birçok uygulamada kullanılması planlanan 3D-YüA'lar, enerji tüketimini azaltarak performansın artmasına neden olacakları düşünülmektedir.



## 4. MODEL

Bu bölümde, enerji farkındalıklı uygulamaya özgü 3D-YüA topoloji tasarım probleminin tanımı ve sunulacak olan yöntemdeki modeller yer almıştır.

### 4.1. Enerji Modeli

Bu çalışmada sunulan yöntemde, 3D-YüA'nın dinamik enerji tüketimini hesaplamak için, iyice tanınan yaygın bir enerji modeli olan  $E_{bit}$  enerji modeli [44] kullanılmıştır. Bu modelde, tüketilen toplam enerji miktarı, aktarımda olan bütün bitlerin bağlantılar ve yönlendiriciler gibi ağ bileşenlerinin üzerinde tükettikleri enerji miktarına dayalı olarak tahmin edilmektedir. Bu çalışmada statik enerji tüketimi hesaba katılmadığından, enerji tüketiminden bahsedilen bütün bölümlerde, kastedilen aslında dinamik enerji tüketimidir.

YüA'larda iletişimden doğan enerji tüketiminden iki önemli kaynak yani yönlendiriciler ve bağlantılar sorumlu tutulmaktadır, buna göre de ağ üzerinde aktarımda olan tek bir bitin tükettiği toplam enerji miktarı  $E_{Tbit}$ , Formül 4.1 kullanılarak hesaplanmaktadır. Söz konusu olan formülde  $E_{Rbit}$  ve  $E_{Lbit}$  sırasıyla, aktarımda olan bir bitin yönlendiricilerde ve bağlantılarda tükettiği enerji miktarını temsil etmektedir.

$$E_{Tbit} = E_{Rbit} + E_{Lbit} \quad (4.1)$$

Bağlantılarda tüketilen enerji miktarıysa, katman-üstü yatay bağlantılar ve SAB bağlantılarda tüketilen enerjinin toplamından elde edilmektedir. Bir bitin bağlantılar üzerinde tükettiği toplam enerji miktarı  $E_{Lbit}$ , Formül 4.2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu formülde  $E_{Linkbit}$  ve  $E_{SABbit}$  sırasıyla, aktarımda olan bir bitin katman-üstü bağlantılar ve SAB'larda tükettiği enerji miktarını temsil etmektedir.

$$E_{Lbit} = E_{Linkbit} + E_{SABbit} \quad (4.2)$$

Sonuç olarak 3D-YüA'da,  $v_i$  düğümünden  $v_j$  düğümüne aktarımda olan bir bitin tükettiği toplam enerji miktarı  $E_{Tbit}^{v_i, v_j}$ , Formül 4.3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$E_{Tbit}^{v_i, v_j} = \eta_{v_i, v_j} \times E_{Rbit} + \delta_{v_i, v_j} \times E_{Linkbit} + \gamma_{v_i, v_j} \times E_{SABbit} \quad (4.3)$$

Bu formülde  $\eta_{v_i, v_j}$ ,  $\delta_{v_i, v_j}$  ve  $\gamma_{v_i, v_j}$  sırasıyla,  $v_i$  düğümünden  $v_j$  düğümüne aktarımda olan tek bir bitin üzerinden geçtiği yönlendirici, katman-üstü bağlantı ve SAB sayısını temsil etmektedir. Anlatılanlara bakılırsa 3D-YüA'da iletişiminden doğan toplam enerji tüketim miktarı  $E_{3D-YÜA}$ , Formül 4.4 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu formülde  $w_{i,j}$ ,  $v_i$  ve  $v_j$  düğümleri arasında saniyede aktarımda olan veri miktarını temsil etmektedir.

$$E_{3D-YÜA} = \sum_{\forall e_{i,j} \in E} w_{i,j} \times E_{Tbit}^{v_i, v_j} \quad (4.4)$$

Bu çalışmada, Formül 4.3 kullanılarak elde edilen, tek bir bitin  $v_i$  düğümünden  $v_j$  düğümüne geçiş yaparken tükettiği enerji miktarının yanı sıra, başka bir değer olan  $v_i$  ve  $v_j$  düğümleri arasındaki toplam iletişim maliyetini temsil eden *Cost* değeri de kullanılmıştır. İletişim maliyeti Formül 4.5 kullanılarak hesaplanmaktadır bu formülde  $\eta_{v_i, v_j}$ ,  $v_i$  ve  $v_j$  düğümleri arasında bitlerin geçiş yaptığı yönlendirici sayısını temsil etmektedir. Toplam iletişim miktarı ve iletişim maliyeti direk olarak birbiriyle orantılı olmalarına rağmen tüketilen enerji miktarı ve iletişim maliyeti birbirinden farklı miktarlardırlar.

$$Maliyet = \sum_{\forall e_{i,j} \in E} w_{i,j} \times (\eta_{v_i, v_j} - 1) \quad (4.5)$$

İki düğüm arasındaki iletişimden doğan enerji tüketim miktarını hesaplamak için bitlerin bu düğümler arasında aktarımda iken geçiş yaptıkları bağlantılar ve yönlendiricilerde tükettikleri enerji miktarını hesaplamaya gerek vardır. Ancak iletişim maliyetinin miktarı, yönlendiriciler ve bağlantılardaki bit başına tüketilen enerji miktarından bağımsız olarak sadece iki düğüm arasında aktarımda olan bitlerin sayısı ve bu bitlerin geçiş yaptığı yönlendiricilerin sayısı ile alakalıdır. Örnek olarak  $v_i$  ve  $v_j$  düğümleri aynı yönlendiriciye

bağlı oldukları bir durumda, bitlerin bu yönlendiricide enerji tüketimine neden olmalarına rağmen, Formül 4.5 kullanılarak hesaplanan iletişim maliyeti miktarı sıfır değerini gösterecektir.

## 4.2. Alan Modeli

YüS bileşenlerinin gün geçtikçe artmasıyla beraber mantıklı olarak bu yongaların kapsadıkları alan miktarı da artmıştır, buna göre de alan kısıtlamaları ortaya çıkmıştır. 3D yongalarda yonga katmanını birkaç katmana bölündüğünden, yonganın kapsa alanında düşüş yaşanmaktadır. Yonga alanını olabildiğince azaltmak ve yonga performansı arttırmak için sistem bileşenlerinin katmanlar arasında dengeli dağılması gerekmektedir. Bu yüzden 3D-YüA'ların tasarım aşamasında, alan bilgilerinin de göz önünde bulunmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, sistem ve ağ bileşenlerinin yonga üzerindeki kesin yerleri ele alınmadığından, sadece YüS bileşenlerinin alanı tasarım aşamasında hesaba katılmamıştır.

$$A_{3D-YüA} = \sum_{i=1}^r a_{c_i} \quad (4.6)$$

Bu çalışmada sunulan yöntemde yonga bileşenleri kümelere ayrıldığından, 3D-YüA alanı  $A_{3d-YüA}$ , Formül 4.6 kullanılarak hesaplanmaktadır. Söz konusu formülde  $a_{c_i}$ ,  $c_i$  kümesini oluşturan bileşenlerin kapsadığı toplam alan miktarını temsil etmektedir.

## 5. TOPGEN 3D YÖNTEMİ

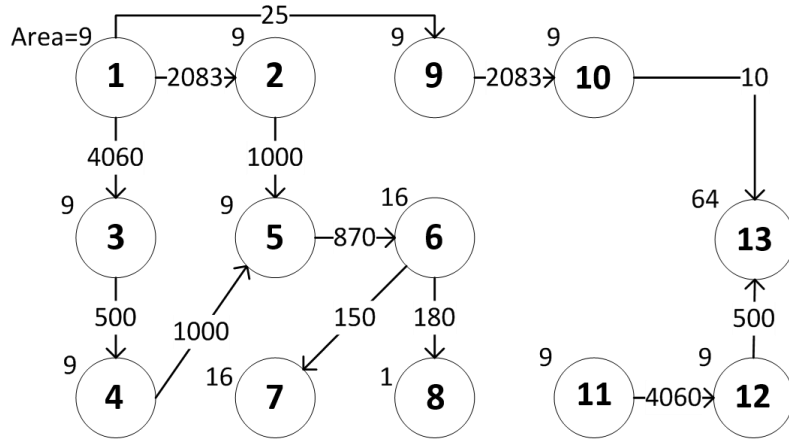
### 5.1. Problem Tanımı

Uygulamaya özgü 3D-YüA'lar, her biri farklı bileşenden oluşabilen yığın halinde birbiri üstüne yerleştirilen birden fazla katmandan oluşmaktadırlar. 3D yongalarda katmanlar arası veri iletişimi genelde dikey silikon arası bağlantılar (SAB) kullanılarak sağlanmaktadır. Bu dikey bağlantılar her hangi iki katman arasında kurulabilmektedirler ancak aralarında başka katman veya katmanlar olan katmanları birbirine bağlamak için SAB'ların aradaki katmanlardan geçmelerine gerek vardır. Aradaki katmanlardan geçiş yapma işlemi, zor ve maliyeti olmasının yanı sıra aradaki katmanlarda alan israfına da neden olacağından, bu çalışmada sunulan yöntemde SAB'ların sadece komşu katmanlar arasında kurulabileceği varsayılmıştır. SAB'ların imalatının zor ve maliyeti fazla olduğundan ayrıca kısıtlı bant genişliğine sahip olduklarından, 3D yongalarda katmanlar arası iletişim trafiğinin miktarı dikkat ile belirlenmelidir. Bileşenlerin katmanlara bölünmesi esnasında ayrıca yonga katmanlarının alanlarının da dengeli olmasına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada yukarıda anlatılan ve tasarım için gerekli olan bütün gereksinimler ve iletişimden doğan enerji tüketimi hesaba katılmıştır ayrıca bileşenlerle yönlendiriciler ve yönlendiricilerin kendi aralarındaki bütün bağlantılar iki-taraflı olarak farz edilmiştir. Ayrıca her uygulama eşdeğeri olan bir İletişim Çizgesiyle (İÇ) ve her topoloji eşdeğeri olan bir Topoloji Çizgesiyle (TÇ) temsil edilmiştir.

**Tanım 1:** İletişim çizgesi (İÇ) yönlü bir çizgedir ve  $G = (V, E, W, A)$  ile temsil edilmektedir. Çizgedeki her köşe,  $v_i \in V$ , uygulamaya ait bir düğümü ve her kenar,  $e_{i,j} \in E$ , uygulamanın  $v_i$  ve  $v_j$  düğümlerinin arasındaki iletişimi temsil etmektedir.  $v_i$  ve  $v_j$  düğümlerinin arasındaki saniyede aktarımda olan veri miktarıysa,  $w_{i,j} \in W$  ile temsil edilmiştir. Her düğümün  $v_i$  kapsadığı alan miktarıysa  $a_i \in A$  temsil edilmektedir.

Şekil 5.1’de, 13 bileşenden oluşan Mp3 encoder uygulamasına ait İÇ verilmiştir. Bu şekilde, düğümlerin numaraları dairelerin içinde, düğümler arasındaki saniyede aktarımda olan veri miktarları düğümleri birbirine bağlayan kenarların üzerinde ve düğümlerin kapsadıkları alan miktarları dairelerin dışında gösterilmiştir. Alan miktarlarının metriği ise, en küçük bileşenin kapsadığı alana göre hesaplanmıştır, örnek olarak Şekil 5.1’de görüldü üzere en az alan kapsayan düğüm olan  $v_7$  düğümünün alanı 1 olarak farz edilerek diğer düğümlerin alanı bu düğümün alanına göre hesaplanmıştır. Kullanılan alan metriğine göre,  $v_0$  düğümü  $v_7$  düğümünün 9 katı alan kapsadığından, bu düğümün kapsadığı alan miktarı 9 olarak var sayılmıştır.

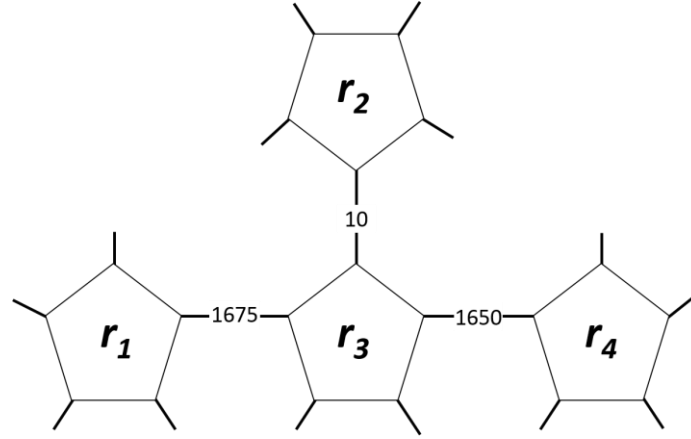


Şekil 5.1. Mp3 Enc uygulamasının iletişim çizgesi

**Tanım 2:** Topoloji çizgesi ( $TÇ$ ) yönsüz bir çizgedir ve  $T = (R, L, B, P)$  şeklinde temsil edilmektedir. Bu çizgede  $R$ , topolojide kullanılan yönlendirici setini ve  $L$  yönlendiricilerin arasındaki bağlantılar setini temsil etmektedir. Topoloji çizgesindeki her köşe  $r_i \in R$  uygulamaya ait bir yönlendiriciyi ve her kenar  $l_{i,j} \in L$ ,  $r_i$  ve  $r_j$  yönlendiricilerin aralarındaki iletişimi temsil etmektedir.  $r_i$  ve  $r_j$  yönlendiricilerin aralarındaki saniyede aktarımda olan veri miktarı ise  $b_{i,j} \in B$  ile ve yönlendiricilerin 2D kapı sayısı  $p \in P$  ile temsil edilmektedir.

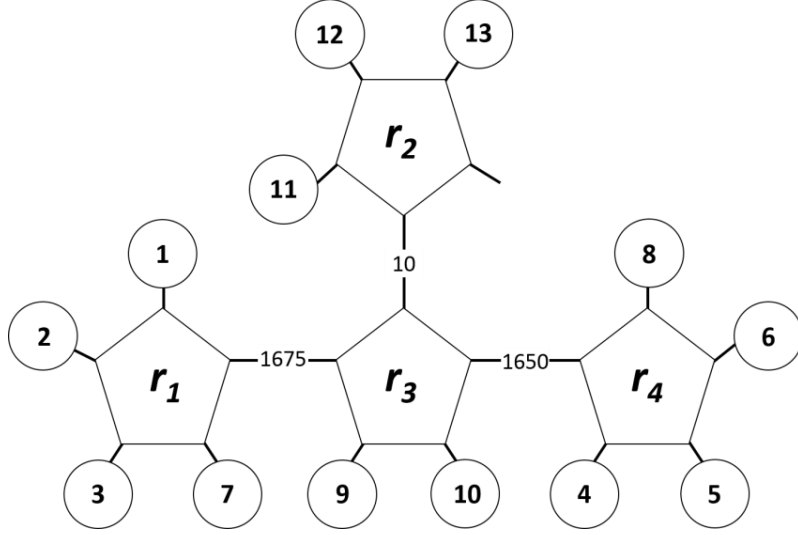
Problemin karmaşıklığını kabul edilir bir aralıkta tutmak için, daha önce yayınlanan birçok çalışmada olduğu gibi [10], [11], yönlendiricilerin homojen olduğu veya başka bir deyişle bütün yönlendiricilerin kapı sayılarının eşit olduğu var sayılmıştır. Şekil 5.2’de, 5-kapılı

yönlendiriciler kullanılarak Mp3 encoder uygulaması için oluşturulan topoloji çizgesi verilmiştir. Dört adet yönlendiricinin kullanıldığı bu topolojide Mp3 encoder uygulamasının 13 bileşeni tarafından kullanılmaya hazır boş 14 yönlendirici kapısı bulunmaktadır.



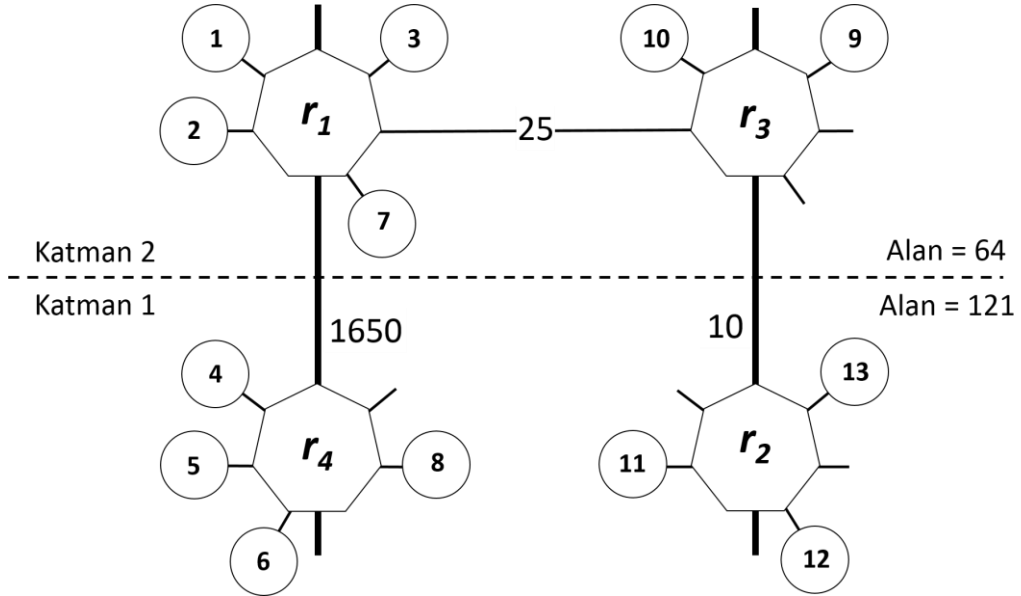
Şekil 5.2. Mp3 Enc için oluşturulan topoloji çizgesi

Topoloji oluşturulduktan sonra, uygulamanın bu topolojiye eşlenmesine gerekmektedir, bu aşama esnasında, topoloji çizgesindeki boş yönlendirici kapıları uygulamaya ait düğümlere tahsis edilirler. Genel olarak uygulamanın topolojiye eşlenmesinden amaç, yönlendiricilerin arasındaki iletişimi veya iletişimden doğan enerji tüketim miktarını en aza indirmektir. İletişimden doğan toplam enerji tüketim miktarı, yönlendiriciler ve bağlantılar üzerinde aktarımda olan bitlerin sayısı ile direkt olarak orantılı olduğundan, bu çalışmada, iletişim miktarını en aza indirmeye çalışılmıştır. Şekil 5.3'te, Mp3 encoder uygulamasının Şekil 5.2'deki topoloji çizgesine eşlenmiş hali verilmiştir, bu şekil de ayrıca yönlendiriciler arasındaki iletişim miktarları da belirtilmiştir.



Şekil 5.3. Mp3 Enc uygulamasının Şekil 5.2'deki topolojiye eşlenmiş hali

Topoloji oluşturulup uygulamanın bu topolojiye eşlenmesinden sonra, bu topolojiye ait düğümlerinin 3D yonganın hangi katmanına yerleşmesi gerektiğine karar verilmektedir. Karar aşamasında, kümeler arası iletişim trafiğinin yanı sıra yonga katmanlarının alanlarının dengeli olmasına da dikkat edilmektedir. Katmanlar arası iletişimde kullanılan SAB bağlantıları, katman-üstü yatay bağlantılardan çok daha kısa olduklarından, daha hızlı olmalarının yanı sıra daha da az enerji tüketmektedirler.



Şekil 5.4. Şekil 5.3'te verilen topolojinin iki katmanlı 3D yongaya bölünmüş hali

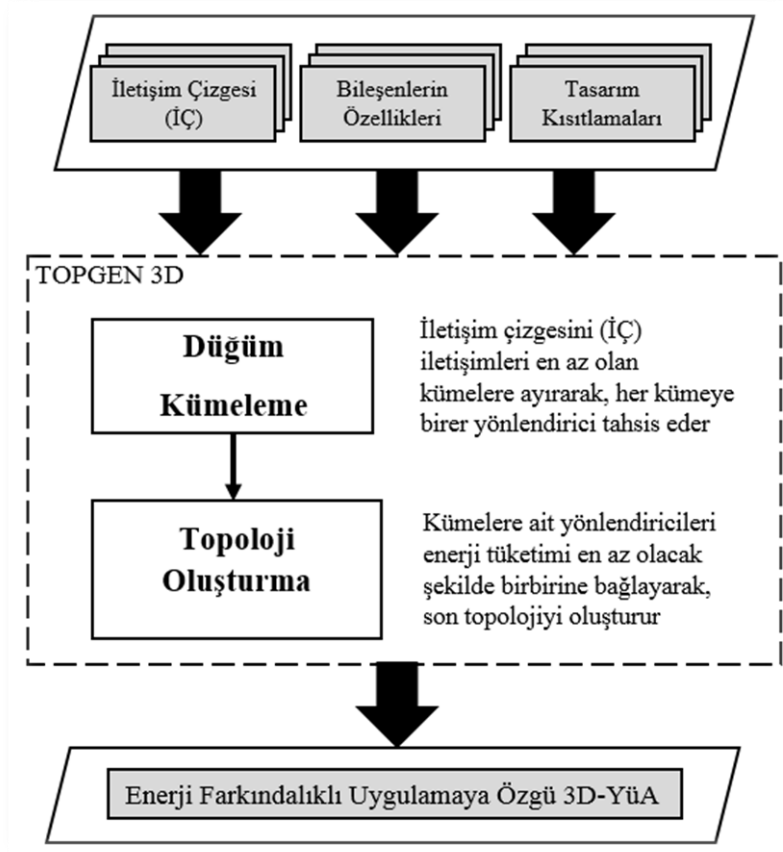
Şekil 5.4'te, Şekil 5.3'te verilen topolojinin iki katmanlı 3D yongaya bölünmüş hali verilmiştir. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere, yapılan katmanlara bölme işleminde amaç sadece enerji tüketimini en aza indirmek olduğundan, katmanların alanları arasında dengeli sayılacak bir durum mevcut değildir. İdeal olarak iki katmana sahip bir 3D yongaya bölme sonucunda, 2D sürüme karşı %50 alan azalması beklenmektedir ancak Şekil 5.4'te verilen örnekte görüldüğü üzere sadece %38'lik bir alan azalması meydana gelmiştir. Bunun nedeniyse yöntemin önceliğinin enerji tüketimini azaltmak olmasıdır ancak yöntemde mümkün olduğu kadar ikinci öncelik olan yonga alanının azaltılması da göz önünde bulundurmaya çalışılmıştır.

**Problem: Uygulamaya özgü 3D-YüA topoloji oluşturma problemi.** Uygulamayı temsil eden bir iletişim çizgesi  $G(V, E, W, A)$ , kapı sayıları belli olan yönlendiriciler, katman-üstü bağlantılar ve SAB'ların bant genişliği kısıtlamaları verilmiştir. Buradaki amaç ise, bant genişliği kısıtlamalarını karşılayacak şekilde, toplam enerji tüketimi en az olan tam bağlı uygulamaya özgü 3D-YüA için geçerli bir topoloji oluşturmaktır. Buradaki temel amaç enerji tüketimini en aza indirmek iken, ikinci amaç yonga alanını en aza indirmek olacaktır.

## 5.2. TopGen 3D Yöntemi

Bu bölümde iki aşamadan oluşan, uygulamaya özgü 3D-YüA'ların tasarımında kullanılması planlanan, TopGen 3D yönteminin detayları yer almaktadır. Sunulan yöntemin akış diyagramı Şekil 5.5'te verilmiştir. Yöntemin ilk aşamasında kullanılan algoritma olan Düğüm Kümeleme algoritmasının çıktısı, ikinci aşamadaki algoritmanın girdisi olarak kullanılmaktadır. İkinci aşamadaki algoritma olan Topoloji Oluşturma algoritmasının çıktısı ise tasarıma hazır enerji farkındalıklı son topoloji olacaktır. Sıradaki bölümlerde TopGen 3D yöntemine ait bu iki algoritma sırasıyla anlatılmıştır.





Şekil 5.5. TopGen 3D yönteminin akış diyagramı

### 5.2.1. Düğüm Kümeleme (Genel Açıklama)

Daha önce sunulan algoritmanın [11] iyileştirilmiş sürümü olan Düğüm Kümeleme algoritması, girdi olarak ona verilen uygulamaya ait iletişim çizgesini (İÇ) birbiriyle iletişimleri en az olan  $m$  kümeye bölünmesinden sorumludur. Daha sonraysa kümelere birer yönlendirici tahsis ederek her kümenin düğümlerinin sadece o kümeye ait yönlendiriciye bağlanmasını sağlamaktadır. Bu kümeler, nihai topoloji olan topoloji çizgesini (TÇ) oluşturmakta kullanılan Küme Çizgesini (KÇ) oluşturmaktadırlar. Düğümlerin kümelere bölünmesinin amacı, en çok iletişimde olan düğümleri birbiri yanına aynı kümelere yerleştirerek kümeler arası iletişimi en aza indirmektir. Düğüm Kümeleme problemi, kümelere düğüm sayısı kısıtlamasının eklenmesiyle klasik en az k-kesim problemine dönüştürülebilmektedir.

**Tanım 3:** Küme Çizgesi (KÇ) yönsüz bir çizgedir  $P = (C, H)$ , çizgedeki her köşe ise  $c_i \in C$ , en fazla  $p - 1$  düğümden oluşabilen bir kümeyi ve her kenar  $h_{i,j} \in H$ ,  $c_i$  ve  $c_j$  kümelerinin arasındaki iletişimi temsil etmektedir.  $c_i$  ve  $c_j$  kümelerine ait yönlendiricilerin arasındaki toplam veri iletişim miktarı  $b_{i,j}$ , Formül 5.1 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$b_{i,j} = \sum_{\forall e_{k,l} \in E} w_{k,l} \quad s. t. : \quad \forall k, l; \quad k \neq l \quad (5.1)$$

$$v_k \in c_i \wedge v_l \in c_j$$

**Tanım 4:**  $G = (C, E)$  çizgesinin  $Kesim_G$  miktarı,  $G$  çizgesinin küme düğümlerinin  $C = c_1, c_2, \dots, c_m$  aralarındaki toplam veri iletişim miktarını temsil etmektedir,  $m$  ise  $G$  çizgesinden ayırılan kümelerin sayısını temsil etmektedir.  $G$  çizgesinin  $Kesim_G$  miktarı Formül 5.2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu formülde,  $G$  çizgesinin  $k$  ve  $l$  düğümlerinin arasındaki iletişim miktarı  $w_{k,l}$  ile temsil edilmektedir.

$$Kesim_G = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m \sum_{\forall e_{k,l} \in E} w_{k,l} \quad s. t. \quad \forall k, l; \quad k \neq l \quad (5.2)$$

$$v_k \in c_i \wedge v_l \in c_j$$

En az k-kesim problemi, NP-Tam bir problem sayılmaktadır [45]. Bu problemi çözmek için bu çalışmada hızlı sezgisel bir çözüm sunulmuştur.

Topolojilerde fazla sayıda yönlendiricinin kullanılması, kapı sayıları az olan küçük ve daha az enerji tüketen yönlendiriciler anlamına gelmektedir ancak bunun sonucunda, gönderilen veri paketleri hedefe ulaşmak için daha fazla adımdan geçmeleri gerekmektedir ki bu da daha fazla enerji tüketimine sebep olmaktadır. Diğer yandan az sayıda yönlendiricinin kullanılması, düğümlerin birbirine yakın ve sonuç olarak veri paketlerinin kaynaktan hedefe giciş yaparken daha az adımdan geçmeleri gerektiğine ve daha az enerji tüketimi anlamına gelmektedir ancak diğer taraftan kapı sayıları fazla olan büyük ve daha fazla enerji tüketen yönlendiriciler demektir [14]. Anlatılanlara bakıldığında, en yüksek performansı elde etmek için uygulamada kullanılacak olan yönlendiricilerin boyutların ve sayılarının belirlenmesinin önemi açıklamaktadır. Bu çalışmada sunulan yöntemde, yönlendiricilerin

fazla güç tüketimindeki negatif etkilerine dayanarak yönlendiricilerin sayılarının en az olması tercih edilmiştir. Bu yüzden topoloji oluşturmaya başlamadan önce, geçerli topolojiler oluşturmak için gerekli olan en az yönlendirici sayısının belirlenmesine ihtiyaç vardır.

$$r = \left\lceil \frac{(n-2)}{p-2} \right\rceil \quad (5.3)$$

Mantıklı olarak,  $r$  yönlendiriciyi birbirine bağlamak için en az  $r-1$  bağlantıya ihtiyaç duyulmaktadır. Her yönlendiricinin  $p$  adet 2D kapısı olduğu ve uygulamanın toplamda  $n$  düğümden oluştuğu varsayıldığında, geçerli bir topoloji oluşturmak için gerekli olan en az yönlendirici sayısı, Formül 5.3 kullanılarak hesaplanmaktadır.

### 5.2.2. Düğüm Kümeleme (Algoritma)

Geçerli bir topoloji oluşturmak için en az sayıda ihtiyaç olan yönlendirici sayısı Formül 5.3 kullanılarak belirlendikten sonra, sıra sözde kodu Algoritma 5.1'de verilen Düğüm Kümeleme algoritmasına gelmektedir. İsminden de anlaşıldığı üzere bu algoritmanın görevi bir uygulamaya ait iletişim çizgesini (İÇ) alarak  $r$  kümeye ayırmaktır öyle ki en çok iletişimde olan düğümler aynı kümeye yerleştirilerek kümeler arası iletişim en aza indirilsin. Algoritma ilk başta uygulamanın düğüm sayısını temsil eden  $n$  adet aday küme oluşturarak her kümeye bir düğüm (baş düğüm) ve bu düğümün en çok iletişimde olduğu  $p-2$  komşu düğümünü yerleştirmektedir (sıra 2). Kümelere ayırma işlemi esnasında dikkate alınması gereken bir nokta ise kümelere ait yönlendiricilerde, başka yönlendiricilerin daha sonra bağlanması için en az bir kapının boş bırakılmasıdır. Bu yüzden kümelere ait eleman sayısının  $p-1$ 'i geçmemesine dikkat edilmektedir.

Daha sonraysa her kümenin dâhili iletişim miktarı hesaplanarak, kümeler bu miktara göre çoktan aza sıralanırlar (sıra 3-4).  $c_i$  kümesinin toplam dâhili iletişim miktarı  $t_{c_i}$ , Formül 5.4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

---

**Algoritma 1:** Düğüm Kümeleme algoritması

---

**Data:**  $G(V, E), p$ .  
**Result:**  $P(C, H)$ .

```
1 begin
2    $n$  aday küme oluştur  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ ;
3   Her kümenin  $c_i$ , toplam dâhili iletişim miktarı,  $t_{c_i}$  hesapla;
4    $C$  küme setindeki kümeleri,  $t_{c_i}$  değerlerine göre çoktan aza sırala;
5   for each ( $c \in C$ ) do
6     for each ( $d \in C$ ) do
7       if  $c \cap d > 1 \wedge \text{başdüğüm}(c \text{ or } d) \in c \cap d \wedge t_{c_i} \neq 0$  then
8         if  $t_{d-c \cap d} < t_{c \cap d}$  then
9            $c \cap d$ ,  $d$  kümesinden ele;
10           $t_d$  güncelle;
11         else if  $t_{d-c \cap d} > t_{c \cap d}$  then
12           if ( $\text{başdüğüm}(c) \in c \cap d$ ) then
13              $(c \cap d) - \text{başdüğüm}(c)$ ,  $c$  kümesinden ele;
14              $\text{başdüğüm}(c)$ ,  $d$  kümesinden ele;
15           else if ( $\text{başdüğüm}(d) \in c \cap d$ ) then
16              $(c \cap d) - \text{başdüğüm}(d)$ ,  $d$  kümesinden ele;
17              $\text{başdüğüm}(d)$ ,  $c$  kümesinden ele;
18            $t_d$  ve  $t_c$  güncelle;
19           end if
20         else
21            $c \cap d$ ,  $c$  kümesinden ele;
22            $t_c$  güncelle;
23         end if
24       else
25         if  $t_c > t_d$  then
26            $c \cap d$ ,  $d$  kümesinden ele;
27            $t_d$  güncelle;
28         else
29            $c \cap d$ ,  $c$  kümesinden ele;
30            $t_c$  güncelle;
31         end if
32       end for
33     end for
34    $C$  küme setindeki kümeleri,  $t_{c_i}$  değerlerine göre çoktan aza sırala;
35   Her kenarın  $\forall h_{i,j} \in H, b_{i,j}$  değerini Formül 5.1 kullanarak hesapla;
36   while  $|C| > r$  do
37      $c_i$  ve  $c_j$  kümelerini seç, öyle ki  $|c_i| + |c_j| \leq p - 1$  ve  $b_{i,j}$  en az olsun;
38      $c_i = c_i \cup c_j$ ;
39      $C = C - c_j$ ;
40      $t_{c_i}$  güncelle;
41      $C$  küme setindeki kümeleri,  $t_{c_i}$  değerlerine göre çoktan aza sırala;
42     Her kenarın  $\forall h_{i,j} \in H, b_{i,j}$  değerini Formül 5.1 kullanarak hesapla;
43   end while
44 end
```

## Algoritma 5.1. Düğüm Kümeleme algoritması

$$t_{c_i} = \sum_{\forall e_{k,l} \in E} w_{k,l} \quad s. t. \quad \forall k, l; \quad k \neq l, \quad (5.4)$$

$$v_k \in c_i \wedge v_l \in c_i$$

Bu formülde  $w_{k,l}$ , aynı kümeyle ait olan  $k$  ve  $l$  düğümlerinin aralarındaki saniyede aktarımda olan veri miktarını temsil etmektedir. Her düğümün sadece ve sadece tek bir kümeyle ait olması gerektiği için, kümeler arasındaki ortak düğümlerin elenmesi gerekmektedir. Ortak düğümlerin kümelere elenmesi için bir döngü başlatılarak (sıra 5-33) en fazla dâhili iletişim trafiğine sahip kümeden başlayarak kümeler sırayla seçilir ve geri kalan kümelere teker teker karşılaştırılırlar. Karşılaştırmalar esnasında bazı koşullar çerçevesinde kümelere elenmesi gereken ortak düğümler, dâhili iletişim trafiğinde en az etkileri oldukları kümelere elenirler. Karşılaştırma işlemi, her düğümün sadece ve sadece tek bir kümeyle ait olmasına kadar devam etmektedir. Ayrıca bu işlem esnasında düğümleri kalmayan kümeler, küme listesinden elenmektedirler.

Algoritma tarafından seçilen  $c$  ve  $d$  ile temsil edilen kümelere karşılaştırılmasında, aralarında ortak düğüm veya düğümlerin mevcut olması durumunda bu düğümlerin elenmesinde kullanılan koşullar aşağıda verilmiştir.

- $c$  ve  $d$  kümeleri arasında  $c$  veya  $d$  kümesinin baş düğümü dahil birden fazla ortak düğüm varsa ve  $c$  kümesinin toplam dâhili iletişim miktarı sıfır değilse ve ortak düğümler  $d$  kümesinden elendikten sonra bu kümenin toplam dâhili iletişim miktarı, ortak düğümlerin iletişiminden daha az ise, ortak düğümler  $d$  kümesinden elenerek bu kümenin toplam iletişim miktarı güncellenir (sıra 8-10).
- $c$  ve  $d$  kümeleri arasında  $c$  veya  $d$  kümesinin baş düğümü dahil birden fazla ortak düğüm varsa ve  $c$  kümesinin toplam dâhili iletişim miktarı sıfır değilse ve  $d$  kümesinden ortak düğümler elendikten sonra bu kümenin toplam dâhili iletişim miktarı, ortak düğümlerin iletişiminden daha fazla ise ve sadece  $c$  kümesinin baş düğümü ortak düğümler arasındaysa,  $c$  kümesinin baş düğümü hariç ortak düğümler  $c$  kümesinden ve  $c$  kümesinin baş düğümü,  $d$  kümesinden elenir ve her iki kümenin toplam iletişim miktarı güncellenir (sıra 12-14).

- $c$  ve  $d$  kümeleri arasında  $c$  veya  $d$  kümesinin baş düğümü dahil birden fazla ortak düğüm varsa ve  $c$  kümesinin toplam dâhili iletişim miktarı sıfır değilse ve  $d$  kümesinden ortak düğümler elendikten sonra bu kümenin toplam dâhili iletişim miktarı, ortak düğümlerin iletişiminden daha fazla ise ve sadece  $d$  kümesinin baş düğümü ortak düğümler arasındaysa,  $d$  kümesinin baş düğümü hariç ortak düğümler  $d$  kümesinden ve  $d$  kümesinin baş düğümü,  $c$  kümesinden elenir ve her iki kümenin toplam iletişim miktarı güncellenir (satır 15-17).
- $c$  ve  $d$  kümeleri arasında  $c$  veya  $d$  kümesinin baş düğümü dahil birden fazla ortak düğüm varsa ve  $c$  kümesinin toplam dâhili iletişim miktarı sıfır değilse ve  $d$  kümesinden ortak düğümler elendikten sonra bu kümenin toplam dâhili iletişim miktarı, ortak düğümlerin iletişim miktarıyla eşit ise, ortak düğümler  $c$  kümesinden elenerek bu kümesinin toplam iletişim miktarı güncellenir (satır 20-22).
- $c$  ve  $d$  kümeleri arasında ortak düğüm varsa,  $c$  veya  $d$  kümesinin baş düğümü bu ortak düğümler arasında değilse veya ortak düğümler arasında mevcut ise  $c$  kümesinin toplam dâhili iletişim miktarı sıfır ise, ortak düğümler toplam dâhili iletişim miktarı en az olan kümeden elenerek bu kümenin toplam iletişim miktarı güncellenir (satır 24-30).

Kümelerin aralarındaki ortak düğümlerin elenmesinden sonra, kümeler bir kez daha dâhili iletişim miktarlılarına göre çoktan aza sıralanarak kümelerin arasındaki iletişim miktarları hesaplanmaktadır (satır 34-35). Sonrasında ise, her kümeye birer yönlendirici tahsis edileceğinden kümelerin sayısının gerekli olan en az yönlendirici sayısından fazla olup olmadığı kontrol edilmektedir. Küme sayısının fazla olması durumunda ( $|C| > r$ ), küme sayısının ideal sayıya ulaşmasına kadar, kümeler birbiriyle birleştirilmeye çalışılırlar. Birleştirme işlemi esnasında kümeler ikişer ikişer kıyaslanarak, birleşmeleri sonucunda oluşan yeni kümenin düğüm sayısının  $p - 1$  miktarını aşmadığı kümeler arasından aralarındaki iletişim miktarı  $b_{i,j}$ , en fazla olan kümelerin birleştirilmesine karar verilmektedir. Düğüm Kümeleme algoritmasının çıktısı,  $Kesim_g$  miktarı veya başka bir değiş ile kümeler arası iletişim miktarı en az olan ve bir sonraki aşamada kullanılacak olan bir çizge ( $KÇ$ ) olacaktır.

### 5.2.3. Topoloji Oluşturma Algoritması

TopGen 3D yönteminin ikinci aşaması, Topoloji Oluşturma algoritmasından oluşmaktadır. Birinci aşamadaki algoritmanın çıktısı, bu algoritmada girdi olarak kullanılmaktadır. Topoloji oluşturma algoritması, oluşturulacak olan topolojinin tam bağlı olması, yönlendiricilerin kapı ve yonga katman sayısı limitinin aşılmaması ve en önemlisi toplam enerji tüketiminin en aza indirilmesinden sorumludur. Algoritma kümelere ait yönlendiricileri birbirlerine bağlayarak tasarım amaçlarına ulaşmaya çalışmaktadır. Oluşturulacak olan topolojide hem katman-üstü bağlantılar (yatay) hem de katmanlar arası SAB'lar (dikey) kullanılacaktır. SAB'lar katman-üstü bağlantılardan çok daha kısa, hızlı ve enerji farkındalıklı olduklarından, algoritmanın önceliği mümkün olduğu kadar SAB'lardan yararlanmak olacaktır.

Topoloji oluşturma algoritmasında birinci aşamadaki algoritmaya benzer bir yöntem kullanılmaktadır. İlk olarak girdi olarak alınan küme listesindeki kümeler, komşu kümelerle iletişim ağırlıklarına göre çoktan aza sıralanarak, listenin başında yer alan küme ilk küme olarak yonganın birinci katmanına yerleştirilmektedir. Sonrasındaysa yonga üzerine yerleştirilen kümelerle en çok iletişimde olan kümeler teker teker seçilerek duruma göre toplam maliyet az olacak veya yonga katmanlarının alanı dengeli olacak şekilde, daha önce yerleştirilen kümelere bağlanarak katmanlara yerleştirilirler. Katmanlara yerleştirme işlemi esnasında, fazla iletişimde olan kümelerin komşu katmanlara yerleştirilip SAB'lar kullanılarak birbirine bağlanmaları algoritmanın önceliği olacaktır. SAB'lardan yararlanmak mümkün olmadığı durumlarda ise kümeler katman-üstü bağlantılar kullanılarak birbirine bağlanmaktadır. Ayrıca katmanlar arasında dengeli alan dağılımı için toplam maliyetin fazla etkilenmeyeceği durumlarda, kümeler toplam maliyet az olacak şekilde nin yerine katmanların alanı dengeli olacak şekilde birbirine bağlanmaktadır. Bu işlemin amacı, enerji tüketimini en aza indirmenin yanı sıra ayrıca yonga katmanlarının alanının da dengede olmasını sağlamaktır.

Bazı tasarım kurallarına aykırı olacağından kümeleri her hangi bir katmana serbestçe yerleştirmek mümkün değildir. Bu kuralların listesi aşağıda verilmiştir.

- 1) Yönlendiricilerin kapı sayısı kısıtlıdır ve bu sayıdan fazla kapı kullanılmamalıdır.
- 2) SAB'ların sadece yönlendiriciler arası bağlantılarda kullanılmasına izin verildiğinden, her iki yönlendirici arasında birden fazla SAB kullanılmamalıdır.
- 3) SAB'lar, iletişimleri fazla olan komşu katmanlardaki kümeler arasında kullanılmaları tercih edilmelidirler.
- 4) Yonganın katman sayısı limiti aşılmamalıdır.

Bu şartların hepsi sağlandığı takdirde, iki kümeye ait yönlendiriciler SAB kullanılarak birbirine bağlanırlar aksi takdirdeyse daha fazla enerji tüketimine yol açan yatay katman-üstü bağlantılar kullanılarak yönlendiricilerin birbirine bağlanmaları çalışılmaktadır. Başka kümelere bağlanmak için seçilen kümeye ait yönlendiricinin, daha önce yerleştirilen kümelerin yönlendiricilerine bağlanması mümkün olmayan durumlarda ise bir sonraki yüksek iletişim miktarına sahip küme seçilerek işleme devam edilmektedir. Bu işlem bütün kümeler 3D yonganın katmanları üstüne yerleştirilip yönlendiricilerinin birbirine bağlanmalarına kadar devam etmektedir. Topoloji oluşturma algoritmasının çıktısı, 3D-YüA için enerji farkındalıklı uygulamaya özgü bir topolojisi olacaktır.

#### 5.2.4. Topoloji Oluşturma Algoritmasının Detayları

Bu bölümde, sözde kodu Algoritma 5.2'de verilen ve son topolojiyi oluşturmakta kullanılan Topoloji oluşturma algoritmasının teknik detayları yer almaktadır. Bu algoritmanın çalışması için gerekli girdiler birinci algoritmanın çıktısı olan küme çizgesi  $P(C, H)$ , yönlendiricilerin 2D kapı sayısı  $p$ , Formül 5.3 kullanılarak elde edilen en az gerekli olan yönlendirici sayısı  $r$ , 3D yonganın mimarisinde kullanılması planlanan katman sayısı  $l$  ve son olarak  $P$  çizgesindeki kümelerin alan bilgileri olacaktır. Algoritma girdileri kabul ettikten sonra  $P$  çizgesindeki kümelerin sayısını kontrol ederek küme sayısının yönlendirici sayısından az olması durumunda ( $|C| < r$ ), eşitliği sağlamak için küme setine gerekli sayıda boş küme veya kümeler eklemektedir (satır 2-3). Daha sonra  $P$  çizgesindeki kümelerin teker teker seçilip ona aktararak son topolojinin üzerinde oluşturulacağı boş bir çizge olan  $\hat{P} = (\hat{C}, \hat{H})$  çizgesi oluşturulmaktadır. Küme setindeki kümelere öncelikler tahsis edilerek kümeler bu önceliklerine göre fazladan aza sıralanmaktadır (satır 5). Bu öncelikler, kümelerin komşu kümelerle olan iletişim ağırlıklarına göre tahsis edilmektedirler buna göre



kümeler arasında en yüksek kenar ağırlığına sahip olan kümenin önceliği daha fazladır. Mantıklı olarak her kenarın iki küme arasında yer aldığından, en az iki küme aynı önceliğe sahip olacaklardır ve bu durumda komşu kümeleriyle en yüksek iletişim miktarına sahip olan kümenin önceliği daha fazla kabul edilmektedir. Kümelerin öncelikleri tahsis edildikten sonra önceliği en fazla olan küme  $c_i$  seçilerek,  $C$  küme setinden  $\hat{C}$  küme setine aktarılır ayrıca bu kümeye ait yönlendirici  $r_i$ 'da  $R$  yönlendirici setine eklenerek,  $c_i$  kümesi ilk katmana yerleştirilir ve bu kümeye ait yönlendiricinin boş 2D ve 3D kapıları hesaplanır (satr 6-9).

İlk küme yerleştirildikten sonra,  $C$  küme setindeki geri kalan kümelerin  $\hat{C}$  setine aktarılması bitene kadar devam eden bir döngü başlatılmaktadır (satr 10-49). Buna göre *kesim*  $c_i$  miktarı en yüksek olan kümeler,  $C$  küme setinden seçilerek  $\hat{C}$  küme setine aktarılır ayrıca  $P$  ile  $\hat{P}$  çizgelerindeki kenarlar seti  $H$  ve  $\hat{H}$  güncellenirler (satr 11-13).  $C$  küme setindeki bir kümenin *kesim*  $c_i$  miktarı, söz konusu kümenin  $\hat{C}$ 'deki kümelerle iletişim miktarını temsil etmektedir.

Algoritmanın önceliği iletişimden doğan enerji tüketimini azaltmak olduğundan, kümelere ait yönlendiricileri toplam iletişim maliyeti en az olacak şekilde birbirine bağlamaya çalışmaktadır. Ancak katmanların alanlarının da dengede olması için, toplam iletişim maliyetinin etkilenmeyeceği veya fazla etkilenmeyeceği durumlarda, kümelere ait yönlendiriciler katmanlarının alanları dengeli olacak şekilde birbirine bağlanmaktadır. Örnek olarak  $c_i$  kümesi en çok iletişimde olduğu  $c_j$  kümesinin  $r_i \in R$  yönlendiricisinde her iki 3D kapının boş olduğu bir durumda, toplam iletişim maliyetinin etkilenmeyeceğinden,  $c_i$  kümesi yonga katmanlarının alanı dengeli olacak şekilde,  $c_j$  kümesinin olduğu bir alt veya bir üst katmanına yerleştirilerek bu kümeye bağlanmaktadır. Toplam maliyetin fazla etkilenmeyeceği durumları belirlemek için ise bir eşik tanımlanmaktadır.  $C$  küme setinden  $\hat{C}$  küme setine aktarılan küme  $c_i$  kümesinin *kesim*  $c_i$  miktarı eşik miktarından az olduğu ayrıca bu kümeye ait yönlendirici  $r_i$ ,  $R$  setinde en çok iletişimde olduğu yönlendiriciye SAB yoluyla bağlanması mümkün olmadığı durumlarda,  $c_i$  kümesi ve bu kümeye ait yönlendirici, katmanların alanı dengeli olacak şekilde en çok iletişimde olduğu kümeye ait  $r_j$  yönlendiricisine bağlanmaktadır.

---

**Algoritma 2:** Topoloji Oluşturma algoritması

---

```
Data:  $P(C, H), p, r, l, \{a_{c_1}, a_{c_2}, \dots, a_{c_r}\}$   
Result:  $T(R, L, B, P)$ , Maliyet.  
1 begin  
2   if ( $|C| < r$ ) then  
3      $r - |C|$  boş küme,  $C$  küme setine ekle;  
4      $R = \theta, L = \theta, \hat{C} = \theta, \hat{H} = \theta$ ;  
5     öncelik_tahsisi( $C$ );  
6     Önceliği en yüksek kümeyi,  $c_i$  seç;  
7      $\hat{C} = \hat{C} + c_i; C = C - c_i; R = R + r_i$ ;  
8     yüzey_tahsisi( $c_i$ ); //  $c_i$  kümesini yeni bir yüzeye yerleştirilir  
9     boş_2Dkapı =  $p - |c_i|$ ; boş_3Dkapı = 2; //  $|c_i| = c_i$  kümesinin düğümlerin sayısı  
10    while ( $C \neq \emptyset$ ) do  
11      En yüksek  $kesim_{c_i}$  miktarma sahip kümeyi,  $c_i$  seç;  
12      //  $kesim_{c_i} = \sum_{\forall h_{i,j} \in H} b_{i,j} \quad \forall i, j; i \neq j, c_i \in C \wedge c_j \in \hat{C}$   
13       $\hat{C} = \hat{C} + c_i; C = C - c_i$ ;  
14       $\forall c_j \in \hat{C}: \hat{H} = \hat{H} + h_{i,j}; H = H - h_{i,j}$ ;  
15      if ( $boş_{3Dkapı} > 0 \wedge boş_{3Dkapı} \text{ of } r_j > 0 \wedge |yüzey| \leq l$ ) then  
16         $R = R + r_i$ ;  
17         $r_i$  ve  $r_j$  yönlendiricilerini maliyet ve alan en az olacak şekilde SAB' ile birbirine bağla;  
18         $L = L + L_{i,j}$ ;  
19        boş_2Dkapı = boş_2Dkapı +  $p - |c_i|$ ;  
20      else if ( $boş_{2Dkapı} + p - 2 - |c_i| > 0$ ) then  
21         $R = R + r_i$ ;  
22        if ( $kesim_{c_i} < eşik$ ) then  
23           $r_i$  ve  $r_j$  yönlendiricilerini alan dengeli olacak şekilde yüzey-üstü bağlantı ile birbirine bağla;  
24        else  
25           $r_i$  ve  $r_j$  yönlendiricilerini maliyet en az olacak şekilde yüzey-üstü bağlantı ile birbirine bağla;  
26           $L = L + L_{i,j}$ ;  
27          boş_2Dkapı = boş_2Dkapı +  $p - 2 - |c_i|$ ; boş_3Dkapı = boş_3Dkapı + 2;  
28      else // eğer boş_2Dkapı +  $p - 2 - |c_i| = 0$   
29        foreach ( $c_k \in C$ ) do  
30           $kesim_{c_k}$  hesapla;  
31          boş_2Dkapık = boş_2Dkapı +  $2(p - 2) - (|c_i| + |c_k|)$ ;  
32          En yüksek  $kesim_{c_k}$  değerine sahip  $\wedge$  boş_2Dkapık > 0 olan  $c_k$  seç;  
33           $\hat{C} = \hat{C} + c_k; C = C - c_k$ ;  
34           $\forall c_l \in \hat{C}; \hat{H} = \hat{H} + h_{k,l}; H = H - h_{k,l}$ ;  
35        end for  
36         $R = R + r_k$ ;  
37         $r_i$  ve  $r_l$  yönlendiricilerini maliyet en az olacak şekilde yüzey-üstü bağlantı ile birbirine bağla;  
38         $L = L + L_{k,l}; R = R + r_i$ ;  
39        if ( $boş_{3Dkapı} > 0 \ \& \ |yüzey| \leq l$ ) then  
40           $r_i$  ve  $r_j$  yönlendiricilerini maliyet en az olacak şekilde SAB' ile birbirine bağla;  
41          boş_2Dkapı = boş_2Dkapı +  $2p - 2 - (|c_i| + |c_k|)$ ;  
42          boş_3Dkapı = boş_3Dkapı + 2;  
43        else  
44           $r_i$  ve  $r_j$  yönlendiricilerini maliyet en az olacak şekilde yüzey-üstü bağlantı ile birbirine bağla;  
45          boş_2Dkapı = boş_2Dkapı +  $2(p - 2) - (|c_i| + |c_k|)$ ;  
46          boş_3Dkapı = boş_3Dkapı + 4;  
47        end if  
48         $L = L + L_{i,j}$ ;  
49      end if  
50    end while  
51  return  $T$  ve Maliyet;
```

## Algoritma 5.2. Topoloji oluşturma algoritması

Algoritma ilk önce iletişimleri fazla olan kümeleri komşu katmanlara yerleştirerek, kümelere ait yönlendiricileri daha az enerji tüketen SAB'lar kullanarak birbirine bağlamaya çalışmaktadır. Kümelerin SAB yoluyla birbirine bağlanmaları çeşitli nedenlerden dolayı mümkün olmadıysa, kümeler aynı katmana yerleştirilerek onlara ait yönlendiriciler katman-üstü bağlantılar vasıtasıyla birbirine bağlanmaktadır.

$\hat{C}$  küme setine yeni aktarılan kümeyle ait  $r_i$  yönlendiricisinin, daha önceden yonga üzerine yerleştirilen yönlendiriciler arasından en çok iletişimde olduğu yönlendirici  $r_j$  yönlendiricisine hangi biçimde bağlanacağı ve kümelerin hangi katmanına yerleşeceğine karar vermek için, aşağıda anlatılan şartların yerine getirilip getirilmediği kontrol edilmektedir.

- Daha önceden  $R$  setine eklenen yönlendiricilerde boş 3D kapısı mevcut ise ve yerleştirilmek üzere olan  $c_i$  kümesinin en çok iletişimde olduğu kümeyle ait  $r_j$  yönlendiricisinde boş 3D kapı varsa ayrıca  $c_i$  ile  $c_j$  kümesinin SAB yoluyla bağlanması katman sayısı limitinin aşılmasına sebep olmuyorsa,  $r_i$  ve  $r_j \in R$ , maliyet az olacak şekilde SAB kullanılarak birbirine bağlanırlar ve kapı sayıları güncellenirler (sıra 14-18).
- $R$  setindeki yönlendiricilerin her hangisinin 3D kapısı boş değilse veya bu kapı vasıtasıyla bağlanacak olan  $c_i$  kümesi, katman sayısı limitinin aşılmasına sebep oluyorsa ayrıca  $r_i$ ,  $R$ 'deki yönlendiricilere bağlandıktan sonra her hangi bir yönlendiricide boş 2D kapı mevcut kalıyorsa ve  $c_i$  kümesinin *kesim*  $c_i$  miktarı eşik miktarından az ise,  $r_i$  ve en çok iletişimde olduğu yönlendirici  $r_j \in R$ , katmanların alanı dengeli olacak şekilde katman-üstü bağlantıyla birbirine bağlanırlar. Anlatılan bütün şartlar yerine getirilip sadece  $c_i$  kümesinin *kesim*  $c_i$  miktarı eşik miktarından fazla ise,  $r_i$  ve  $r_j$  toplam maliyet az olacak şekilde katman-üstü bağlantıyla birbirine bağlanırlar. Son olarak ise  $R$  setindeki yönlendiricilerin boş 2D ve 3D kapı sayıları güncellenmektedir (sıra 19-26).

- $R$  setindeki yönlendiricilerin her hangisinin 3D kapısı boş değilse veya bu kapı vasıtasıyla bağlanacak olan  $c_i$  kümesi, katman sayısı limitinin aşılmasına sebep oluyorsa, ayrıca  $r_i$ ,  $R$ 'deki yönlendiricilere bağlandıktan sonra her hangi bir yönlendiricide boş 2D kapı mevcut olmuyorsa,  $C$ 'deki kümeler arasında *kesim*  $c_k$  miktarı en fazla olan ve bu kümeye ait  $r_k$  yönlendiricisi ve  $r_i$ ,  $R$ 'deki yönlendiricilere bağlandıktan sonra en azından bir boş 2D kapı bırakan küme  $c_k \in C$  seçilmektedir (satır 29-31). Daha sonraysa  $c_k$  kümesi  $\hat{C}$  setine aktarılarak  $r_k$  ve en çok iletişimde olduğu yönlendirici  $r_l \in R$  maliyet az olacak şekilde katman-üstü bağlantı kullanılarak birbirine bağlanmaktadır (satır 32-37).  $r_k$  ve  $r_l$  yönlendiricileri birbirine bağlandıktan sonra,  $r_k$  ve  $r_l$  SAB kullanılarak birbirine bağlandığı takdirde yonga katman sayısının limiti aşılmayacaksa,  $r_i$  ve  $r_j \in R$ ,  $r_k$  yönlendiricisinin 3D kapı vasıtasıyla maliyet az olacak şekilde birbirine bağlanarak  $R$ 'deki boş 2D ve 3D kapı sayıları güncellenmektedir (satır 39-41). Aksi takdirde  $r_k$  ve  $r_l$  SAB kullanılarak birbirine bağlandıktan sonra yonga katman sayısı limiti aşılyorsa,  $r_i$  ve  $r_j \in R$ ,  $r_k$  yönlendiricisinin 2D kapı vasıtasıyla maliyet az olacak şekilde birbirine bağlanırlar ve  $R$ 'deki boş 2D ve 3D kapı sayıları güncellenmektedir. (satır 43-45).

$C$  setindeki kümelerin hepsi  $\hat{C}$  setindeki kümelere aktarıldıktan sonra algoritma çalışmasını tamamlayarak kullanılmaya hazır son topoloji olan  $T$  topoloji çizgesini ve bu çizgeye ait toplam iletişim maliyetini çıktı olarak vermektedir. Bu çalışmada sunulan TopGen 3D yöntemi, bir sıralama algoritmasına sınırlı kalarak düşük zaman karmaşıklığına sahiptir.

## 6. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, ilk önce TopGen 3D yönteminin çalışması örnek bir uygulama üzerinde adım adım anlatılmıştır, sonrasında ise sunulan yöntemin başka uygulamalara uyarlanmasından elde edilen sonuçlar ve karşılaştırmalar yer almaktadır.

### 6.1.1. Örnek olay incelemesi

Bu kısımda TopGen 3D yönteminin çalışması, 13 düğümden oluşan Mp3 encoder uygulaması üzerinde adım adım anlatılmıştır. İlk olarak, Şekil 5.1’de verilen bu uygulamaya ait iletişim çizgesi ve topolojide kullanması planlanan yönlendiricilerin kapı sayısı  $p = 5$ , sözde kodu Algoritma 5.1’de verilen, yöntemin ilk aşamasındaki algoritma olan Düğüm Kümeleme algoritmasına girdi olarak verilmektedir. Sunulan örnekte 3D-YüA’larda kullanılması yaygın olan ve sade bir mimariye sahip 7-kapılı yönlendiriciler kullanılması varsayılmıştır. Yönlendiricilerdeki kapılardan 5’i 2D kapı olarak sadece katman-üstü bağlantılarda kullanılmaktadır, geri kalan iki 3D kapı ise  $p_{3D} = 2$  sadece SAB kullanılarak yukarı ve aşağı katman bağlantıları için kullanılmaktadır. Geçerli bir topoloji oluşturmak için en az sayıda gerekli olan yönlendirici sayısı Formül 5.3 kullanılarak hesaplanmaktadır, Eşitlik 6.1’de görüldüğü üzere bizim örnekte en az 4 yönlendiriciye ihtiyaç duyulmaktadır.

$$r = \left\lceil \frac{(13 - 2)}{5 - 2} \right\rceil = \frac{11}{3} = 4 \quad (6.1)$$

Düğüm Kümeleme algoritması ilk olarak uygulamanın düğümlerinin sayısı kadar yani 13 aday küme oluşturarak uygulamaya ait her düğümü ve en çok iletişimde olduğu  $5-2=3$  komşu düğümünü bu aday kümelere yerleştirir. Daha sonraysa bu kümeler Formül 5.4 kullanılarak elde edilen toplam dâhili iletişim miktarlarına göre çoktan aza sıralanmaktadır. Mp3 encoder uygulamasının dâhili iletişim miktarlarına göre çoktan aza sıralanmış aday küme listesi Çizelge 6.1’de verilmiştir. Bu çizelgede kümelere ait baş düğümler, bu baş düğümler ile en çok iletişimde olan 3 düğüm ve baş düğümleriyle iletişim miktarları (parantez içerisinde) ve kümelerin toplam dâhili iletişim miktarları görülmektedir.

Çizelge 6.1. Mp3 Enc aday küme listesi

| Aday küme | Baş düğüm | Diğer düğümler |      |     | Toplam iletişim |
|-----------|-----------|----------------|------|-----|-----------------|
|           |           | (3)            | (2)  | (9) |                 |
| $c_1$     | 1         | 4060           | 2083 | 25  | 6168            |
| $c_3$     | 3         | 4060           | 500  | -   | 4560            |
| $c_{12}$  | 12        | 4060           | 500  | -   | 4560            |
| $c_{11}$  | 11        | 4060           | -    | -   | 4060            |
| $c_2$     | 2         | 2083           | 1000 | -   | 3083            |
| $c_5$     | 5         | 1000           | 1000 | 870 | 2870            |
| $c_9$     | 9         | 2083           | 25   | -   | 2108            |
| $c_{10}$  | 10        | 2083           | 10   | -   | 2093            |
| $c_4$     | 4         | 1000           | 500  | -   | 1500            |
| $c_6$     | 6         | 870            | 180  | 150 | 1200            |
| $c_{13}$  | 13        | 500            | 10   | -   | 510             |
| $c_8$     | 8         | 180            | -    | -   | 180             |
| $c_7$     | 7         | 150            | -    | -   | 150             |

Her kümeye birer yönlendirici tahsis edileceğinden ve 4 adet yönlendiricimiz olduğundan, 13 adet olan aday kümelerin sayısının azalmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Kümelerin sayısını azaltmak ve ayrıca her düğümün sadece tek bir kümeyle ait olması için kümeler arasındaki ortak kümelerin elenmesine gerek vardır. Bunun için ilk olarak toplam iletişim miktarı en yüksek olan küme,  $c_1$ 'den başlayarak kümeler teker teker seçilerek başka kümelerle karşılaştırılır ve bu kümelerin aralarındaki ortak kümeler elenirler. Ortak kümelerin elenmesi aşamasının tamamı uzun olduğundan, buradaki örnekte sadece  $c_1$  kümesinin başka kümelerle karşılaştırma aşamaları anlatılmıştır.

$c_1$  ve başka kümelerin arasındaki ortak kümelerin elenmesi için ilk olarak  $c_1$  ve  $c_3$  kümeleri karşılaştırılırlar. İki küme arasındaki ortak düğümler (1 ve 3) birden fazla,  $c_1$  ve  $c_3$  kümelerinin baş düğümü ortak düğümler arasında ve ortak düğümler  $c_3$  kümesinden elendiğinde, bu kümenin toplam dâhili iletişim miktarı, ortak düğümlerinin iletişiminden

daha az olduğu ( $500 < 4060$ ) görülmektedir. Bu durumda ortak düğümler, 1 ve 3 numaralı düğümler,  $c_3$  kümesinden elenerek bu kümenin iletişim değeri güncellenmektedir.  $c_3$  kümesinde tek bir düğüm kaldığından, bu kümenin toplam iletişim miktarı sıfır olarak güncellenmektedir.  $c_1$  kümesi,  $c_{12}$  ve  $c_{11}$  kümeleriyle ortak düğümü olmadığından, algoritmanın bir şey yapmasına gerek yoktur.  $c_1$  ve  $c_2$  kümeleri karşılaştırmasına sıra gelince, bu kümelerin arasındaki durumun  $c_1$  ve  $c_3$  kümeleri arasındaki durum ile aynı olduğundan ( $1000 < 2083$ ), bu yüzden ortak düğümler, 1 ve 2 numaralı düğümler,  $c_2$  kümesinden elenerek bu kümenin toplam iletişim miktarı sıfır olarak güncellenmektedir.

Çizelge 6.2. Mp3 Enc aday küme listesi, ilk kümenin karşılaştırmalarından sonra

| Aday küme | Baş düğüm | Diğer düğümler |             |            | Toplam iletişim |
|-----------|-----------|----------------|-------------|------------|-----------------|
| $c_1$     | 1         | 3<br>(4060)    | 2<br>(2083) | -          | 6143            |
| $c_3$     | -         | -              | 4<br>(500)  | -          | 0               |
| $c_{12}$  | 12        | 11<br>(4060)   | 13<br>(500) | -          | 4560            |
| $c_{11}$  | 11        | 12<br>(4060)   | -           | -          | 4060            |
| $c_2$     | -         | -              | 5<br>(1000) | -          | 0               |
| $c_5$     | 5         | 4<br>(1000)    | -           | 6<br>(870) | 1870            |
| $c_8$     | 9         | 10<br>(2083)   | -           | -          | 2083            |
| $c_{10}$  | 10        | 9<br>(2083)    | 13<br>(10)  | -          | 2093            |
| $c_4$     | 4         | 5<br>(1000)    | -           | -          | 1000            |
| $c_6$     | 6         | 5<br>(870)     | 8<br>(180)  | 7<br>(150) | 1200            |
| $c_{13}$  | 13        | 12<br>(500)    | 10<br>(10)  | -          | 510             |
| $c_8$     | 8         | 6<br>(180)     | -           | -          | 180             |
| $c_7$     | 7         | 6<br>(150)     | -           | -          | 150             |

$c_1$  ve  $c_5$  karşılaştırmasına sıra gelince tek ortak düğümleri, 2 numaralı düğüm, olduğundan ortak düğüm toplam dâhili iletişim miktarı az olan küme, yani  $c_5$  kümesinden elenmektedir.  $c_1$  ve  $c_9$  kümelerini karşılaştırılmasında, iki kümenin birden fazla ortak düğümleri olduğu, her iki kümenin baş düğümünün ortak düğümler arasında yer aldığı ve ortak düğümler  $c_9$

kümesinden elendiğinde, bu kümenin toplam dâhili iletişim miktarı, ortak düğümlerinin iletişiminden daha fazla olduğu görülmektedir ( $2083 > 25$ ). Böyle bir durumda, 9 numaralı düğüm  $c_1$  kümesinden ve 1 numaralı düğüm  $c_9$  kümesinden elenerek, her iki kümenin iletişim değerleri güncellenmektedir.  $c_1$  ve  $c_{10}$  kümeleri arasında ortak düğüm olmadığından, algoritmanın bir şey yapmasına gerek yoktur.  $c_1$  ve  $c_4$  kümeleri karşılaştırılınca, iki kümenin tek ortak düğümleri olduğundan, ortak düğüm, 3 numaralı düğüm, toplam iletişimi az olan küme,  $c_4$  kümesinden elenerek bu kümenin toplam harici iletişim miktarı güncellenmektedir.  $c_1$  kümesinin başka kümeler ile karşılaştırılması bittiğinde, Mp3 encoder uygulamasının aday küme listesini Çizelge 6.2’de verildiği gibi olacaktır.  $c_1$  kümesi diğer kümeler ile ortak düğümü olmadığından, sıra bir sonraki en çok dâhili iletişim miktarına sahip küme olan,  $c_3$  kümesinin başka kümelerle karşılaştırılmasına gelmektedir.

Kümeler arasındaki ortak düğümlerin elenmesinden sonra, Mp3 encoder uygulamasının aday küme listesi Çizelge 6.3’de verildiği şekilde olacaktır. Her düğümün sadece ve sadece tek bir kümeyle ait olduğu bu küme listesinde, düğümleri kalmayan kümeler ise listeden elenmişlerdir.

Çizelge 6.3. Mp3 enc aday küme listesi, kümeler arası ortak düğümler elendikten sonra

| Aday küme | Baş düğüm | Diğer düğümler |             |            | Toplam iletişim |
|-----------|-----------|----------------|-------------|------------|-----------------|
| $c_1$     | 1         | 3<br>(4060)    | 2<br>(2083) | -          | 6143            |
| $c_{12}$  | 12        | 11<br>(4060)   | 13<br>(500) | -          | 4560            |
| $c_5$     | 5         | 4<br>(1000)    | -           | 6<br>(870) | 1870            |
| $c_9$     | 9         | 10<br>(2083)   | -           | -          | 2083            |
| $c_8$     | 8         | -              | -           | -          | 0               |
| $c_7$     | 7         | -              | -           | -          | 0               |

Her kümeyle birer yönlendirici tahsis edileceğinden, küme listesindeki küme sayısı kontrol edilerek bu sayının gerekli olan yönlendirici sayısından fazla olması durumunda kümelerin sayısını azaltmak için bir döngü başlatılmaktadır. Sunulan örnekte 4 adet yönlendirici



kullanılması gerekmektedir ancak Çizelge 6.3’de de görüldüğü üzere 6 adet küme mevcuttur. Bu yüzden bazı kümeler birbiriyle birleştirilerek küme sayısı gerekli olan yönlendirici sayısı ile eşit olması sağlanmaktadır. Sunulan örnekte tek düğüme sahip  $c_8$  kümesi,  $c_5$  kümesi ile birleştirilir. Bu iki kümenin birleşme sebebi ise, birleştirmelerinin küme sayısını ve ayrıca kümeler arasındaki iletişimi azaltmasıdır. Daha sonraysa tek düğüme sahip bir başka küme olan  $c_7$  ve  $c_1$  kümelerinin birleştirilmesine karar verilmektedir. Bu iki kümenin birleşmesi, kümeler arasındaki iletişimi etkilemez iken sadece küme sayısını azaltmak amacıyla yapılmaktadır. Sunulan örnekte olduğu gibi küme listesindeki kümelerin sayısının gerekli yönlendirici sayısı ile eşit olması, ilk algoritmanın çalışmasının bitmiş anlamına gelmektedir.

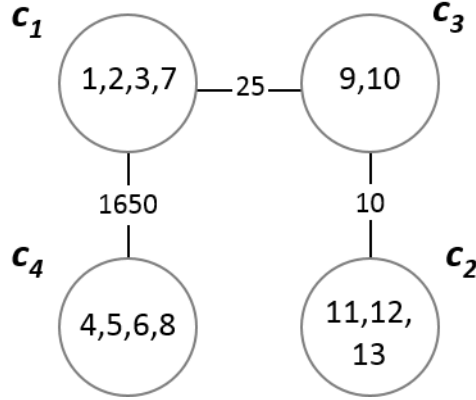
Mp3 encoder uygulamasının Düğüm Kümeleme algoritması çıktısı, toplam dâhili iletişim miktarlarına göre çoktan aza sıralanmış olan 4 kümeden oluşan küme çizgesine eşdeğer küme listesi Çizelge 6.4’te verilmiştir. Bu küme listesinde, kümelerin kapsadıkları alan miktarları ve bu alanların toplam alana göre yüzdesi görülmektedir. Mp3 encoder uygulamasının 5-kapılı yönlendiriciler kullanılarak oluşturulan,  $Kesim_g$  miktarı 1685 Kbits/s olan ve Çizelge 6.4’te verilen küme listesine eşdeğer küme çizgesi Şekil 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Mp3 enc Düğüm kümeleme algoritması çıktısı eşdeğer küme listesi

| Küme  | Düğüm    | Alan           | Toplam dâhili iletişim |
|-------|----------|----------------|------------------------|
| $c_1$ | 1,2,3,7  | 44.86 (%24.28) | 6143                   |
| $c_2$ | 11,12,13 | 84.59 (%45.78) | 4560                   |
| $c_3$ | 9,10     | 18.86 (%10.21) | 2083                   |
| $c_4$ | 4,5,6,8  | 36.43 (%19.72) | 2050                   |

Mp3 encoder uygulamasının son topolojisini oluşturmak için ise, sözde kodu Algoritma 5.2’de verilen Topoloji Oluşturma algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritmaya girdi olarak birinci aşamadaki algoritmanın çıktısı olan, Şekil 6.1’de verilen küme çizgesi, yönlendiricilerin 2D kapı sayısı ( $p = 5$ ), gerekli en az sayıda yönlendiricilerin sayısı ( $r = 4$ ), kullanılması planlanan yonga katman sayısı (sunulan örnekte  $l = 2$ ) ve kümelerin kapsadıkları alan miktarları verilmektedir. Algoritmanın girdilerinden anlaşıldığı üzere,

sunulan örnekte oluşturulacak olan topolojinin iki yüzeli bir yongada kullanılması var sayılmıştır.



Şekil 6.1. Mp3 enc için 5-kapılı yönlendiriciler kullanılarak oluşturulan küme çizgesi

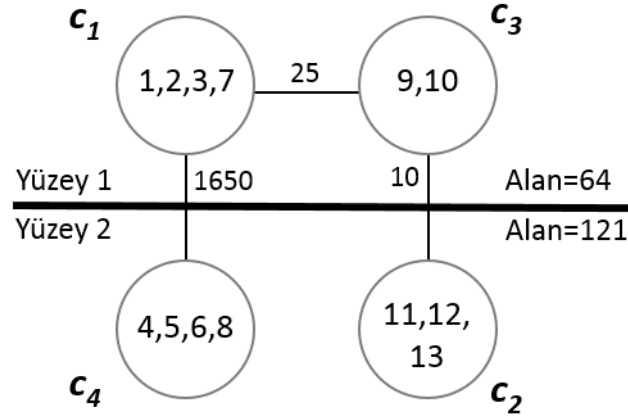
Topoloji oluşturma algoritması, ilk olarak küme sayısını ve gerekli olan en az yönlendirici sayısını karşılaştırarak, kümelerin sayısının gerekli yönlendirici sayısından az olmadığını farkına varmaktadır,  $|C| = r = 4$ , bu yüzden ilaveden boş küme eklemesine gerek yoktur. Daha sonraysa bu 4 kümeyi 2 katmanlı bir yongaya yerleştirmeye çalışmaktadır. Kümelerin seçilip yerleştirme sırasını belirlemek için, daha önce anlatıldığı üzere, kümelere başka kümelerle iletişim ağırlıklarına göre öncelikler tahsis edilmektedir. Şekil 6.1’de verilen küme çizgesindeki kümelerin başka kümeler ile toplam iletişim miktarları ve bu kümelere tahsis edilen öncelikler Çizelge 6.5’te verilmiştir. Şekil 6.1’de görüldüğü üzere, birbiriyle en çok iletişimde olan kümelerin  $c_1$  ve  $c_4$  kümeleri olduğu anlaşılmaktadır, ancak komşu kümeleriyle daha fazla iletişimde olan  $c_1$  kümesinin önceliği daha fazla olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak  $c_1$  kümesi ilk küme olarak seçilerek ilk katmana yerleştirilmektedir. Bu küme yerleştirildikten sonraysa, bu kümeye ait yönlendiricide kaç adet boş kapı bulunduğu hesaplanarak, 1 adet  $(5-4=1)$  boş 2D ve 2 adet boş 3D kapısının olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 6.5. Çizelge 6.4'te verilen kümelerinin yerleştirme öncelikleri

| Öncelik | Küme  | En yüksek kenar ağırlığı   | Toplam harici iletişim |
|---------|-------|----------------------------|------------------------|
| 1       | $c_1$ | $b_{1,4}=1650, b_{1,3}=25$ | 1675                   |
| 2       | $c_4$ | $b_{4,1}=1650$             | 1650                   |
| 3       | $c_3$ | $b_{3,1}=25$               | 35                     |
| 4       | $c_2$ | $b_{2,3}=10$               | 10                     |

$c_1$  kümesi ilk küme olarak yerleştirildikten sonra bu kümenin en çok iletişimde olduğu küme  $c_4$  kümesi seçilerek yonga üzerine yerleştirmeye çalışılmaktadır.  $c_1$  kümesine ait yönlendiricide boş 3D kapı mevcut olduğundan ve  $c_4$  kümesi SAB yoluyla  $c_1$  kümesine bağlandığında yonganın katman sayısının limiti ( $l = 2$ ) aşılmayacağından,  $c_4$  kümesi yeni bir katmana yerleştirilmektedir.  $c_4$  kümesi yeni bir katman olan ikinci katmana yerleştirildikten sonra, bu kümeye ait yönlendirici  $r_4$ ,  $c_1$  kümesinin yönlendiricisi  $r_1$ 'e SAB yoluyla bağlanarak yonga üzerindeki yönlendiricilerin toplamda boş olan 2D kapı sayıları 2 olarak güncellenmektedir.

Sırada yerleştirilecek küme olarak, daha önce yonga üzerine yerleştirilen  $c_1$  ve  $c_4$  kümeleriyle en çok iletişimde olan küme,  $c_3$  kümesi seçilmektedir. Daha önce yerleştirilen kümelere ait yönlendiricilerde boş 3D kapı mevcut olmasına rağmen ise,  $c_3$  kümesine ait yönlendirici  $r_3$ , bu yönlendiricilerin her hangi birine SAB yoluyla bağlandığında, katman sayısı 3'e yükseleceğinden ve katman sayısı limiti olan 2'nin aşılabacağından,  $c_3$  katman-üstü bağlantı kullanılarak, en çok iletişimde olduğu yönlendiriciye bağlanması gerekmektedir.  $c_3$  en çok iletişimde olduğu  $c_1$  kümesine katman-üstü bağlantı vasıtasıyla bağlandıktan sonra yerleştirilen yönlendiricilerde 3 adet boş 2D kapı mevcut olacağından ve bu kümenin  $c_1$  ve  $c_4$  kümeleriyle iletişim miktarı eşik miktarından (Kesim miktarının %10'undan) daha az olduğundan ( $25 < 168$ ),  $c_3$  en çok iletişimde olduğu  $c_1$  kümesine yonga katmanları dengede olacak şekilde bağlanması gerekmektedir. Bu yüzden  $c_3$ ,  $c_1$  kümesinin olduğu katmana yerleştirilerek bu kümelere ait yönlendiriciler katman-üstü bağlantı kullanılarak birbirine bağlanırlar ve yonga üzerindeki yönlendiricilerin boş 2D ve 3D kapı sayıları sırasıyla 3 ve 4 olarak güncellenmektedir.



Şekil 6.2. Mp3 enc uygulamasının topoloji oluşturma aşaması çıktısı son topolojisi

Son olarak  $c_2$  kümesinin yonga üzerine yerleştirmesine sıra gelmektedir. Bu küme, yerleştirilen kümelerin arasında en çok iletişimde olduğu  $c_3$  kümesine ait yönlendiricide boş 3D kapı mevcut olmasından dolayı ayrıca bu ikili SAB yoluyla birbirine bağlandığı takdirde yonga katman sayısı limiti aşılmayacağından,  $c_4$  kümesiyle aynı katmana yerleştirilerek, bu kümeyle ait yönlendirici  $r_2$  SAB kullanılarak  $r_3$ 'e bağlanmaktadır. Son olarak, yerleştirilen yönlendiricilerin boş olan 2D kapı sayıları güncellenmektedir. İki katmana sahip bir yongada kullanılması planlanan, Mp3 encoder uygulaması için oluşturulan ve topoloji oluşturma algoritmanın çıktısı olan 3D topoloji, Şekil 6.2'de verilmiştir. Görüldüğü üzere oluşturulan bu 3D topoloji, 2D sürümüne karşı %34 alan azalması sağlamaktadır.

### 6.1.2. Sonuçları ve Karşılaştırmalar

TopGen 3D yönteminin verimliliği, literatürdeki çalışmalarda da kullanılan farklı bileşen ve bağlantı sayısına sahip 7 gerçekçi YüA uygulaması üzerinde test edilerek, toplam iletişim maliyeti, enerji tüketimi ve alan kapsamına dayalı olarak 2D benzeriyle [11] karşılaştırılmıştır. Bu uygulamalar Mp3 enc [10], 263mp3encoder [10], 263mp3decoder [10], VOPD\_12 [46], VOPD\_16 [46], D26\_media [12] ve D38\_tVOPD [47] uygulamasından ibarettirler.

3D yongalarda ısı dağılımı problemleri [48], imalat zorluğu ve maliyeti yüzünden genel olarak 5’den fazla katmana sahip yongalar tercih edilmediğinden [31], bu çalışmada yapılan testlerde de bütün uygulamalar için 2, 3 ve 4 katmana sahip yongalarda kullanılacak olan 3D topolojiler oluşturularak, tasarım amaçlarına en uygun topolojiyi seçmeye çalışılmıştır.

Formül 4.5 kullanılarak elde edilen toplam iletişim maliyeti, yönlendiricilerin birbirleri arasında gönderdikleri bitlerin toplam sayısını temsil etmektedir. 3D-YüA’ın dinamik enerji tüketimini hesaplamak için ise, daha önce anlatıldığı üzere,  $E_{bit}$  enerji modelinden yararlanmıştır. Sunulan sonuçlarda, daha önce yapılan bir çalışmadan [7] alıntı olarak, yatay katman-üstü bağlantıların ve yönlendiricilerin bit başına tükettikleri enerji miktarları, sırasıyla 0,6 pJ ve 0,11 pJ olarak var sayılmıştır. Katman-üstü bağlantıların farklı adım uzaklığına göre ve yönlendiricilerin farklı kapı sayısına göre bit başına tükettikleri enerji miktarları, Çizelge 6.6 ve 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.6. Farklı adım sayısına göre katman-üstü bağlantıların tükettikleri enerji miktarları

| Yatay bağlantı (adım) | 1   | 2    | 3    | 4    |
|-----------------------|-----|------|------|------|
| pJ/bit                | 0,6 | 0,12 | 0,18 | 0,24 |

Çizelge 6.7. Farklı kapı sayısına göre yönlendiricilerin tükettikleri enerji miktarları

| Kapı   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|--------|------|------|------|------|------|
| pJ/bit | 0,11 | 0,22 | 0,33 | 0,44 | 0,55 |

Önceki çalışmaların da gösterdiğine göre [49], SAB’lar katman-üstü bağlantılardan daha kısa ve hızlı olduklarından, yatay bağlantılardan çok daha düşük miktarda enerji tüketmektedirler. SAB’ların imalatı ve uzunlukları bu bağlantıların tükettikleri enerji miktarlarında etkisi olduğundan, bir bitin SAB’lar üzerinde tükettiği enerji miktarı, katman-üstü bağlantıların üzerinde tükettiği enerji miktarının 1/5’i, 1/4’ü, 1/3’ü, 1/2’si ve 1/1’i olarak var sayılarak bu farklı miktarlara göre sonuçlar elde edilmiştir. Dikkat edilmelidir ki bu çalışmada bağlantıların uzunlukları eşit olarak farz edilerek, uzaklık metriği olarak adım sayısı kullanılmıştır. Önceki çalışmaların gösterdiğine göre [50], SAB’lar 6  $\mu m$  sıklığında

imal edildiklerinde yonga alanının sadece % 1.7'sini işgal etmektedirler. Başka bir çalışmada ise [51] yönlendiricilerin kapsadıkları alan miktarı, bileşenlerin kapsadıkları alan miktarının %5'i olarak tahmin edilmiştir hal bu ki bizim çalışmada düğümlerin yönlendiricileri paylaştıklarından dolayı bu yüzde daha da az olacaktır. Bu yüzden yonga katmanlarının kapsadıkları alanları hesaplamak için, daha önce anlatıldığı üzere, SAB'ların ve yönlendiricilerin alanları hesaba katılmayarak sadece sistem bileşenlerinin alanı hesaba katılmıştır. Alanların metriği ise, daha önce alan modeli bölümünde anlatıldığı üzere, en az alana sahip bileşenin alanına göre belirlenmiştir.

Çizelge 6.8'de TopGen 3D ve 2D sürümünün farklı uygulamalara uygulanarak, kümeler arasındaki iletişimi azaltmaya yönelik işlemlerinin sonucu olan kümelerin arasındaki toplam iletişim miktarları verilmiştir. Söz konusu çizelgede görüldüğü üzere TopGen 3D yöntemi 2D sürümüne karşı ortalama olarak kümeler arasındaki iletişimi %33,72 azalttığı görülmektedir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta ise bu çizelge verilen değerlerin son kullanılmaya hazır topoloji oluşturmadan önce kümeler arasındaki iletişim miktarlarını göstermesidir, buna göre de son topoloji oluşturulduktan sonra kümelerin dizilişlerine göre bu miktarlarda artış yaşanması muhtemeldir.

Çizelge 6.8. TopGen 3D ve 2D sürümü kümeler arası iletişim karşılaştırması

| Uygulama        | V# | E# | İletişim maliyeti |       |                     |
|-----------------|----|----|-------------------|-------|---------------------|
|                 |    |    | 2D                | 3D    | % iletişim azalması |
| VOPD_12         | 12 | 14 | 1072              | 803   | 25,09               |
| VOPD_16         | 16 | 21 | 1136              | 867   | 23,68               |
| 263mp3enc       | 12 | 12 | 76052             | 24862 | 67,31               |
| 263mp3dec       | 14 | 15 | 952               | 952   | 0,00                |
| Mp3 Enc         | 13 | 13 | 3913              | 1685  | 56,94               |
| D26_media       | 26 | 34 | 1020              | 700   | 31,37               |
| D38_tVOPD       | 38 | 48 | 3474              | 2374  | 31,66               |
| <b>Ortalama</b> |    |    | -                 |       | <b>33,72</b>        |

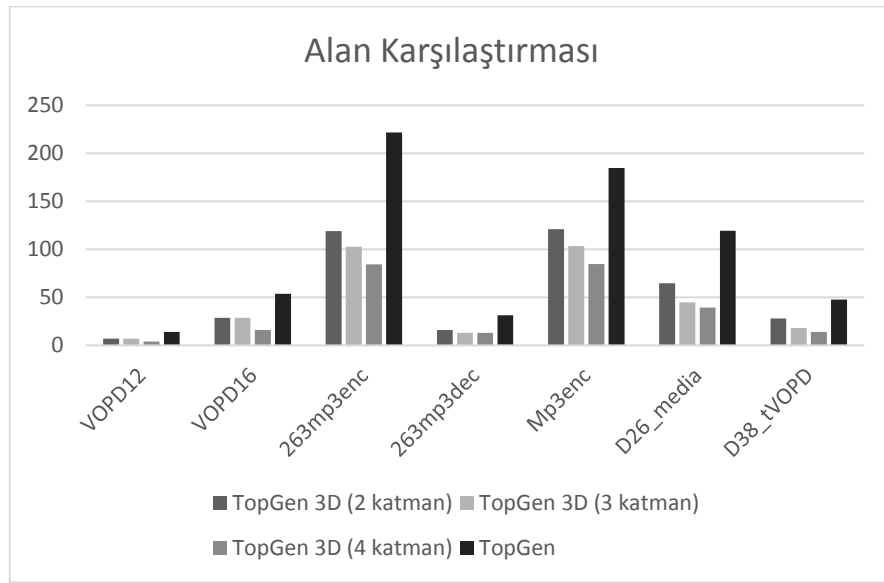
Çizelge 6.9. TopGen 3D (2 katmanlı) ve 2D sürümü çeşitli uygulamalar üzerine karşılaştırması

| Uygulama        | V# | E# | İletişim maliyeti |       |              | Alan |     |              | Enerji tüketimi |         |              |
|-----------------|----|----|-------------------|-------|--------------|------|-----|--------------|-----------------|---------|--------------|
|                 |    |    | 2D                | 3D    | Kazanç (%)   | 2D   | 3D  | Kazanç (%)   | 2D              | 3D      | Kazanç (%)   |
| VOPD_12         | 12 | 14 | 1429              | 803   | 43,81        | 14   | 7   | 50           | 1132,51         | 487,1   | 56,99        |
| VOPD_16         | 16 | 21 | 1509              | 883   | 41,48        | 54   | 29  | 46,30        | 1196,35         | 550,94  | 53,95        |
| 263mp3enc       | 12 | 12 | 114063            | 24887 | 78,18        | 222  | 119 | 46,40        | 89350,45        | 8470,83 | 90,52        |
| 263mp3dec       | 14 | 15 | 1149              | 1139  | 0,87         | 31   | 16  | 48,39        | 920,51          | 581,25  | 36,86        |
| Mp3 Enc         | 13 | 13 | 7496              | 1685  | 77,52        | 185  | 121 | 34,59        | 5752,59         | 584,9   | 89,83        |
| D26_media       | 26 | 34 | 2440              | 1120  | 54,10        | 119  | 65  | 45,38        | 1844,6          | 668,4   | 63,76        |
| D38_tVOPD       | 38 | 48 | 5476              | 4483  | 18,13        | 48   | 28  | 41,67        | 4270,1          | 1555,81 | 63,56        |
| <b>Ortalama</b> |    |    |                   |       | <b>44,87</b> |      |     | <b>44,68</b> |                 |         | <b>65,07</b> |

TopGen 3D ve 2D sürümü kullanılarak oluşturdukları topolojilerin toplam iletişim maliyetleri, enerji tüketim değerleri ve kapsadıkları alan miktarlarının karşılaştırması Çizelge 6.9'te verilmiştir. Ayrıca Çizelge 6.9'da verilen 7 uygulama ve bu uygulamalara ait iletişim çizgesi, TopGen ve TopGen 3D yöntemlerinin 2D topolojiye ve 3D yongaya (2 katman) eşlenmiş çizgeleri ekler bölümünde verilmiştir. Not edilmelidir ki yapılan testlerde, 3D yonganın katman sayısı 2 olarak var sayılmıştır. Söz konusu çizelgede görüldüğü üzere iletişim maliyetinde en fazla %78,18 iyileştirme meydana gelmiştir ayrıca bu iyileştirmenin ortalama değeri %44,87 olmuştur. Yonga alanı kapsama miktarında ise TopGen 3D, 2D benzerine karşı %35 ile %50 arası ve ortalama olarak da %44,68 iyileştirme sağlamıştır, bu da dengeli alan dağılımının bir göstergesidir. Son olarak, TopGen 3D kullanılarak oluşturulan topolojiler, 2D benzerine karşı ortalama olarak %65,07 daha az enerji tüketmektedirler. Bu enerji tasarrufunun nedeniyse iletişim enerjisinin çoğunluğunun kısa nanometre boyutlarındaki SAB'lar üzerinde aktarılması ve SAB'ların da yatay bağlantılara göre çok daha az enerji tüketmeleri gerçeği olmuştur. Bu gerçekler, iletişimden doğan toplam dinamik enerji tüketiminin azalmasına yardımcı olmaktadır.

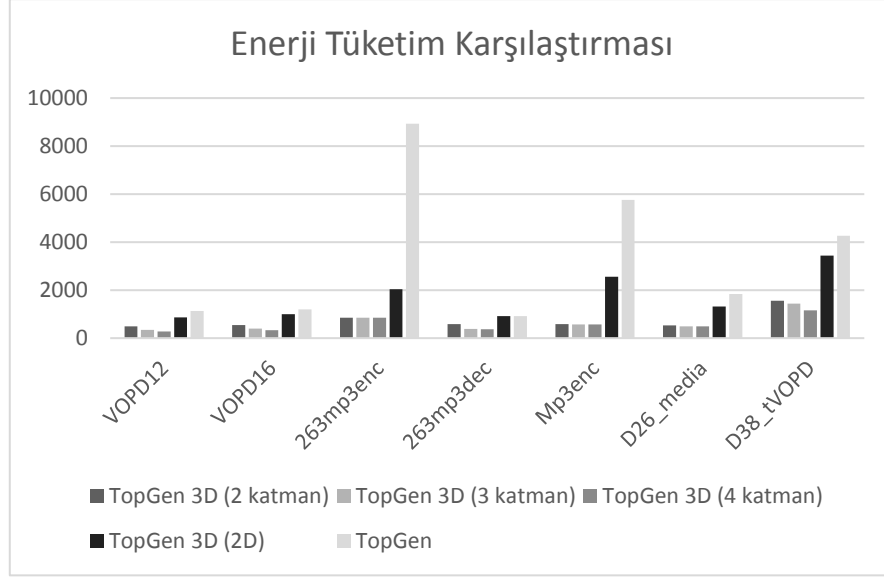
Şekil 6.3'te, sunulan TopGen 3D yöntemi kullanılarak oluşturulan farklı katman sayısına sahip (2-4) yongalarda kullanılmak üzere oluşturulan topolojilerin kapsadıkları alan

miktarları verilmiştir. Dikkat edilmesi gereken nokta ise, her uygulamanın alan metriğinin kendisinin en az alanlı bileşenine göre hesaplanmasında dolayı, uygulamaların topolojilerinin kapsadıkları alan miktarlarının birbiriyle kıyaslanmamasının doğru olmamasıdır. Şekil 6.3'te görüldüğü üzere sunulan yöntemin oluşturduğu 2, 3 ve 4 katmana sahip topolojilerin alan ortalaması, 2D benzerinden %54,47 daha az alan kapsamaktadır. Bu yüzde, TopGen 3D yönteminin farklı uygulamalar için 2, 3 ve 4 katmana sahip yongalarda kullanılmak üzere oluşturduğu topolojilerin kapsadığı alanların ortalamasının, 2D benzerinin oluşturduğu topolojilerin alanları ile karşılaştırmasından elde edilmiştir.



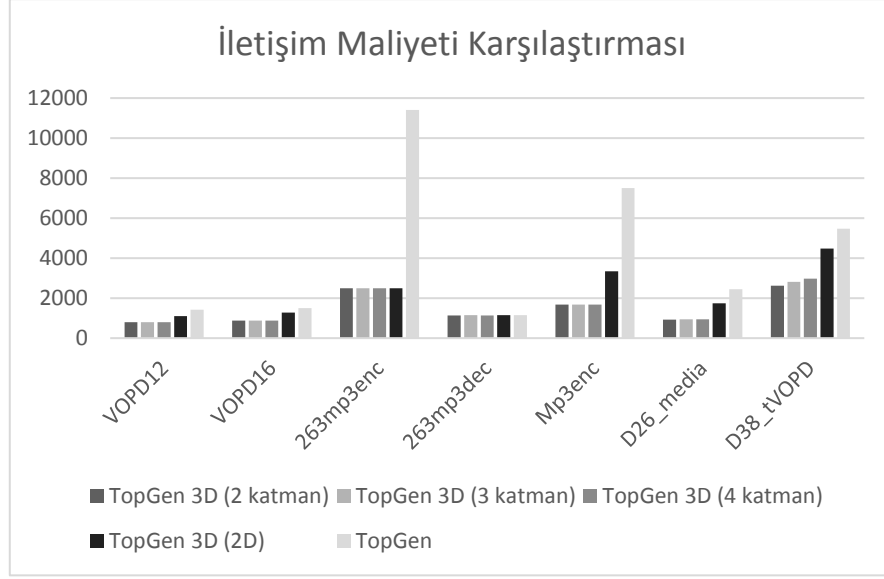
Şekil 6.3. TopGen 3D ve 2D sürümünün alan karşılaştırması





Şekil 6.4. TopGen 3D ve 2D sürümünün enerji tüketim karşılaştırması

Farklı uygulamalar için TopGen 3D ve 2D sürümü tarafından oluşturulan topolojilerde tüketilen enerji değerleri ve toplam iletişim maliyet miktarları sırasıyla Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de verilmiştir. TopGen 3D ve 2D sürümü kullanılarak elde edilen sonuçları karşılaştırırken, sunulan yönteminin 2D yongalar için oluşturduğu topolojilerin tükettiği enerji ve iletişim maliyeti miktarları da kıyaslamaya dâhil edilmiştir. Bu sonuçlar, Çizelge 6.6 ve Çizelge 6.7’de verilen değerler kullanılarak hesaplanmıştır ayrıca SAB’ların tükettikleri enerji miktarları katman-üstü bağlantılarda bit başına tüketilen enerji miktarlarının 1/5’i olarak var sayılmıştır. Not edilmelidir ki 263mp3encoder uygulamasının düğümleri arasındaki iletişimler diğer uygulamalara kıyas daha fazla olduğundan, diyagramın daha anlaşılır olması için bu uygulamanın enerji tüketim ve toplam maliyet miktarlarının sadece %10’u gösterilmiştir.



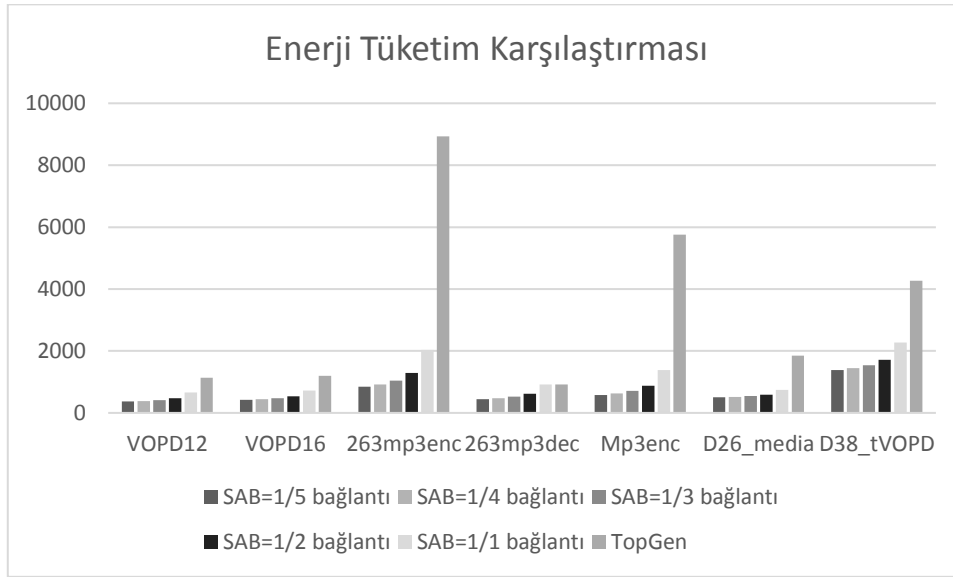
Şekil 6.5. TopGen 3D ve 2D sürümünün iletişim maliyeti karşılaştırması

Şekil 6.4'te görüldüğüne üzere, sunulan yöntemin farklı katman sayısına sahip 3D topolojilerdeki enerji tüketim miktarlarının ortalamaları ve bu yöntemin oluşturduğu 2D topolojilerin enerji tüketim miktarları, yöntemin 2D benzerine göre sırasıyla %88 ve %71 daha azdır. Dikkat edilmesi gereken ise TopGen 3D yönteminin oluşturduğu 2D topolojiler bile yöntemin 2D benzerine karşı daha iyi performans sağlamaktadır.

Şekil 6.5'te görüldüğüne üzere, sunulan yöntemin farklı katmana sahip 3D topolojilerdeki iletişim maliyeti miktarlarının ortalamaları ve bu yöntemin oluşturduğu 2D topolojilerin iletişim maliyeti miktarları, yöntemin 2D benzerine göre sırasıyla %75 ve %72 daha azdır. Bu şekil de gösterilen maliyet miktarlarının farklı katman sayısına sahip 3D yongalarda birbirine yakın olmasının nedeni, bu miktarların sadece aktarımda olan bitlerin toplam sayısını temsil etmesi olmasıdır hal bu ki bu bitlerin katman-üstü veya katmanlar-arası bağlantılarda aktarımda olmaları daha önemlidir. Bu yüzden de enerji tüketim miktarları, 3D yöntemin performansını toplam iletişim maliyetine kıyas daha iyi göstermektedir.

Şekil 6.6'da, SAB'ların katman-üstü bağlantılara göre enerji tüketim miktarları değişmekte olan 2, 3 ve 4 katmanlı 3D yongalar için oluşturulan topolojilerdeki tüketilen enerji miktarlarının ortalaması, sunulan yönteminin 2D yongalar için oluşturduğu topolojilerdeki

enerji tüketim miktarları ve yöntemin 2D benzeri tarafından oluşturulan topolojiler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada SAB'lar üzerindeki bit başına tüketilen enerji miktarları, katman-üstü bağlantılarda tüketilen enerji miktarlarının 1/5'i, 1/4'ü, 1/3'ü, 1/2'si ve 1/1'i olarak var sayılmıştır. Not edilmelidir ki Şekil 6.6'da verilen diyagramda da, Şekil 6.4'te olduğu gibi, diyagramın daha anlaşılır olması için bu 263mp3encoder uygulamasının enerji tüketim miktarlarının sadece %10'u gösterilmiştir.



Şekil 6.6. TopGen 3D ve 2D sürümü enerji tüketim karşılaştırmaları, SAB'ların farklı enerji tüketim miktarlarına göre

Şekil 6.6'da görüldüğü üzere, SAB'ların katman-üstü bağlantılara göre enerji tüketim miktarları değişmekte ve ayrıca eşit olan durumlarda bile bu çalışmada sunulan yöntem, 2D benzerine karşı ortalama olarak %65 daha az enerji tüketmektedir. Söz konusu şekil de açıkça görülmektedir ki SAB'ların enerji tüketim miktarları, katman-üstü bağlantılar ile aynı olduğu durumlarda bile (SAB=1/1 katman-üstü bağlantı) sunulan yöntem, 2D benzerine karşı daha az enerji tüketmektedir.

## 7. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, 3D-YüA için enerji farkındalıklı uygulamaya özgü topoloji oluşturmak için ağ bileşenleri üzerindeki iletişimi azaltmaya yönelik karmaşıklığı fazla olmayan bir yöntem olan TopGen 3D sunulmuştur. Önerilen yöntem daha önce yapılan bir yöntemin geliştirilmiş ve 3D'ye uyarlanmış sürümüdür. Yöntemin amacı, uygulamaya ait düğümlerin arasındaki iletişimi azaltmaya çalışarak iletişimden doğan enerji tüketimini azaltmaktır. Bu amaca ulaşmak için ise iki aşamada ve her aşamada birazcık enerji tüketimi azaltmaya çalışmak olmuştur. İlk aşama, iletişimleri fazla olan düğümlerini aynı kümeye yerleştirip birbirine yakın olmalarını sağlayarak enerji tüketimini azaltmaya çalışan bir topoloji oluşturma algoritmasından oluşmaktadır. Düğümleri kümelere ayırma problemi geniş bir arama uzayına sahip çözülmesi zor bir problem olan en az k-kesim probleminin bir türü sayılmaktadır. İkinci aşamaysa, birinci aşamada oluşturulan topolojiyi 3D yongaya eşleyerek enerji tüketimini biraz daha azaltmak için 3D yongalardaki katmanlar arası kısa ve hızlı bağlantılardan yararlanmaktadır.

Bu çalışmada sunulan TopGen 3D yöntemi, farklı boyutlardaki gerçekçi uygulamaya uyarlanarak test edilmiştir. Sonuçların gösterdiğine göre, sunulan yöntem, 2D topolojiler oluşturmakta bile 2D benzeriyle kıyaslanınca enerji tüketimi, yonga alanı ve toplam iletişim maliyeti alanlarında daha iyi performans sağlamaktadır.

Dikkat edilmesi gerekmektedir ki bu çalışmada, tasarlanan yonganın tükettiği toplam enerjiden bahsedilmeyerek, bileşenlerin tükettikleri dinamik enerji miktarları ve tasarlanan yongada tüketilen statik enerji miktarları hesaba katılmamıştır. Ayrıca her ne kadar bu çalışmada hesaba katılmamış olsalar da, SAB'lar yönlendiricilerin tükettikleri statik enerji miktarlarını etkilemektedirler. TopGen 3D yönteminin enerjide etkisi ve bu yöntemin daha fazla yöntem ile karşılaştırılması, gelecek araştırmalarımızın konusu olacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] J. Cong and J. Wei, “A thermal-driven floorplanning algorithm for 3D ICs,” *Comput. Aided Des.*, pp. 306–313, **2004**.
- [2] P. Guerrier and A. Greiner, “A generic architecture for on-chip packet-switched interconnections,” in *Proceedings Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition 2000 (Cat. No. PR00537)*, **2000**, pp. 250–256.
- [3] G. De Micheli and L. Benini, *Networks on Chips: Technology and Tools*. San Francisco, California: Morgan Kaufmann, **2006**.
- [4] L. Benini and G. De Micheli, “Networks on chips: a new SoC paradigm,” *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 35, no. 1, pp. 70–78, Jan. **2002**.
- [5] S. Kumar *et al.*, “A network on chip architecture and design methodology,” in *Proceedings IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. New Paradigms for VLSI Systems Design. ISVLSI 2002*, **2002**, pp. 105–112.
- [6] W. J. Dally and B. Towles, “Route packets, not wires: on-chip interconnection networks,” in *Proceedings of the 38th Design Automation Conference (IEEE Cat. No.01CH37232)*, **2001**, pp. 684–689.
- [7] B. Yu, S. Dong, S. Chen, and S. Goto, “Floorplanning and topology generation for application-specific Network-on-Chip,” in *2010 15th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, **2010**, pp. 535–540.
- [8] J. Kim *et al.*, “A Novel Dimensionally-decomposed Router for On-chip Communication in 3D Architectures,” in *Proceedings of the 34th Annual International Symposium on Computer Architecture*, **2007**, pp. 138–149.
- [9] J. W. Joyner, P. Zarkesh-Ha, and J. D. Meindl, “A stochastic global net-length distribution for a three-dimensional system-on-a-chip (3D-SoC),” in *Proceedings 14th Annual IEEE International ASIC/SOC Conference (IEEE Cat. No.01TH8558)*, **2001**, pp. 147–151.
- [10] K. Srinivasan, S. Member, K. S. Chatha, and G. Konjevod, “Linear-Programming-Based Techniques for Synthesis of Network-on-Chip Architectures,” vol. 14, no. 4, pp. 407–420, **2006**.
- [11] S. Ozdemir, S. Tosun, and Y. Ar, “Application-specific topology generation algorithms for network-on-chip design,” *IET Comput. Digit. Tech.*, vol. 6, no. 5, pp. 318–333, **2012**.
- [12] S. Murali, L. Benini, and G. De Micheli, “Design of Networks on Chips for 3D ICs,” in *2010 15th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, **2010**, pp. 167–168.
- [13] I. Akturk and O. Ozturk, “Reliability-Aware Heterogeneous 3D Chip Multiprocessor Design,” no. 3d Ic.
- [14] W. Zhong, S. Chen, F. Ma, T. Yoshimura, and S. Goto, “Floorplanning driven Network-on-Chip synthesis for 3-D SoCs,” in *2011 IEEE International Symposium of Circuits and Systems (ISCAS)*, **2011**, pp. 1203–1206.
- [15] S. Yan and B. Lin, “Design of Application-Specific 3D Networks-on-Chip Architectures,” in *3D Integration for NoC-based SoC Architectures*, A. Sheibanyrad, F. Pétrot, and A. Jantsch, Eds. New York, NY: Springer New York,

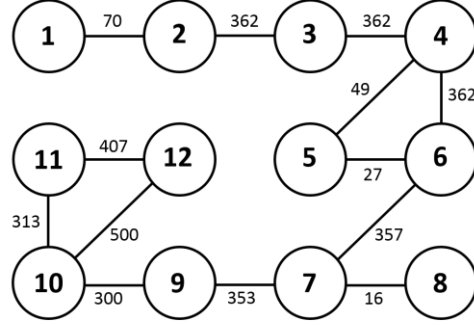
- 2011, pp. 167–191.
- [16] S. Yan and B. Lin, “Design of Application-Specific 3D Networks-on-Chip Architectures,” vol. 407, pp. 142–149, **2008**.
  - [17] I. Akturk and O. Ozturk, “ILP-Based Communication Reduction for Heterogeneous 3D Network-on-Chips,” in *2013 21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing*, **2013**, pp. 514–518.
  - [18] P. Zhou, P.-H. Yuh, and S. S. Sapatnekar, “Application-specific 3D Network-on-Chip design using simulated allocation,” in *2010 15th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, **2010**, pp. 517–522.
  - [19] G. Jullien, Y. Savaria, and W. Badawy, “System-on-chip (SoC) technology: the future of VLSI design,” in *The IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2003. Tutorial Guide: ISCAS 2003.*, **2003**, vol. 1, pp. 1–4.
  - [20] H. De Man, “Future systems-on-a-chip: impact on engineering education,” in *Proceedings Eleventh International Conference on VLSI Design*, **1998**, pp. 572–577.
  - [21] A. S. Berger, “Applying hardware/software co-design to systems-on-a-chip,” in *Wescon/98. Conference Proceedings (Cat. No.98CH36265)*, **1998**, pp. 22–28.
  - [22] X. Wang, M. Yang, Y. Jiang, and P. Liu, “A Power-aware Mapping Approach to Map IP Cores Onto NoCs Under Bandwidth and Latency Constraints,” *ACM Trans. Arch. Code Optim.*, vol. 7, no. 1, p. 1:1--1:30, May **2010**.
  - [23] J. Hu and R. Marculescu, “Energy-aware mapping for tile-based NoC architectures under performance constraints,” in *Proceedings of the ASP-DAC Asia and South Pacific Design Automation Conference, 2003.*, **2003**, pp. 233–239.
  - [24] F. Li, H. Gu, K. Du, Z. Deng, and Z. Huang, “A case study of application specific NoC design,” in *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, **2012**, pp. 759–762.
  - [25] B. Dunne *et al.*, “Fully stacked 3D devices in electron beam recrystallised material,” in *Proceedings. SOS/SOI Technology Workshop*, 1988, p. 70-.
  - [26] M. Matsunami, M. Koba, and R. Miyake, “A study of high density multilayer LSI,” in *1990 Proceedings. International Conference on Wafer Scale Integration*, **1990**, pp. 322–328.
  - [27] C. K. Subramanian and G. W. Neudeck, “A full-wafer SOI process for 3 dimensional integration,” in *Proceedings Ninth Biennial University/Government/Industry Microelectronics Symposium*, **1991**, pp. 195–198.
  - [28] S. Pasricha, “Exploring serial vertical interconnects for 3D ICs,” in *2009 46th ACM/IEEE Design Automation Conference*, **2009**, pp. 581–586.
  - [29] S. Pozder, R. Chatterjee, A. Jain, Z. Huang, R. E. Jones, and E. Acosta, “Progress of 3D Integration Technologies and 3D Interconnects,” in *2007 IEEE International Interconnect Technology Conference*, **2007**, pp. 213–215.
  - [30] W. Jang and D. Z. Pan, “Chemical-Mechanical Polishing-Aware Application-Specific 3D NoC Design,” *IEEE Trans. Comput. Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 940–951, Jun. **2013**.
  - [31] F. Li, C. Nicopoulos, T. Richardson, Y. Xie, V. Narayanan, and M. Kandemir, “Design and Management of 3D Chip Multiprocessors Using Network-in-Memory,”

- in *33rd International Symposium on Computer Architecture (ISCA'06)*, **2006**, pp. 130–141.
- [32] D. Velenis, M. Stucchi, E. J. Marinissen, B. Swinnen, and E. Beyne, “Impact of 3D design choices on manufacturing cost,” in *2009 IEEE International Conference on 3D System Integration*, **2009**, pp. 1–5.
- [33] C. Seiculescu, S. Murali, L. Benini, and G. De Micheli, *3D Network on Chip Topology Synthesis: Designing Custom Topologies for Chip Stacks*. **2011**.
- [34] D. Park *et al.*, “MIRA: A Multi-layered On-Chip Interconnect Router Architecture,” *SIGARCH Comput. Arch. News*, vol. 36, no. 3, pp. 251–261, Jun. **2008**.
- [35] W. Lafi, D. Lattard, and A. Jerraya, “An efficient hierarchical router for large 3D NoCs,” in *Proceedings of 2010 21st IEEE International Symposium on Rapid System Prototyping*, **2010**, pp. 1–5.
- [36] Y. Zhang and J. Hu, “A DFTR router architecture for 3D Network on Chip,” in *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, **2010**, vol. 3, pp. 337–342.
- [37] M. O. Agyeman and A. Ahmadinia, “An adaptive router architecture for heterogeneous 3D Networks-on-Chip,” in *2011 NORCHIP*, **2011**, pp. 1–4.
- [38] S. Ramani and J. Sundararajan, “A case study on NoC router architecture for optimizing the latency,” in *2013 International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*, **2013**, pp. 1–4.
- [39] C. Liu, L. Zhang, Y. Han, and X. Li, “Vertical interconnects squeezing in symmetric 3D mesh Network-on-Chip,” in *16th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC 2011)*, **2011**, pp. 357–362.
- [40] S. Fujita, K. Nomura, K. Abe, and T. H. Lee, “3D on-chip networking technology based on post-silicon devices for future networks-on-chip,” in *2006 1st International Conference on Nano-Networks and Workshops*, **2006**, pp. 1–5.
- [41] K. Lee *et al.*, “Networks-on-chip and Networks-in-Package for High-Performance SoC Platforms,” in *2005 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference*, **2005**, pp. 485–488.
- [42] V. F. Pavlidis and E. G. Friedman, “3-D Topologies for Networks-on-Chip,” in *2006 IEEE International SOC Conference*, **2006**, pp. 285–288.
- [43] B. Feero and P. P. Pande, “Performance Evaluation for Three-Dimensional Networks-On-Chip,” in *IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI (ISVLSI '07)*, **2007**, pp. 305–310.
- [44] T. T. Ye, L. Benini, and G. De Micheli, “Analysis of power consumption on switch fabrics in network routers,” *Proc. 2002 Des. Autom. Conf. (IEEE Cat. No.02CH37324)*, pp. 524–529, **2002**.
- [45] M. R. Garey and D. S. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York, NY, USA: W. H. Freeman & Co., **1979**.
- [46] P. K. Sahu and S. Chattopadhyay, “A Survey on Application Mapping Strategies for Network-on-Chip Design,” *J. Syst. Arch.*, vol. 59, no. 1, pp. 60–76, Jan. **2013**.
- [47] S. Murali, C. Seiculescu, L. Benini, and G. De Micheli, “Synthesis of Networks on Chips for 3D Systems on Chips,” in *Proceedings of the 2009 Asia and South Pacific Design Automation Conference*, **2009**, pp. 242–247.

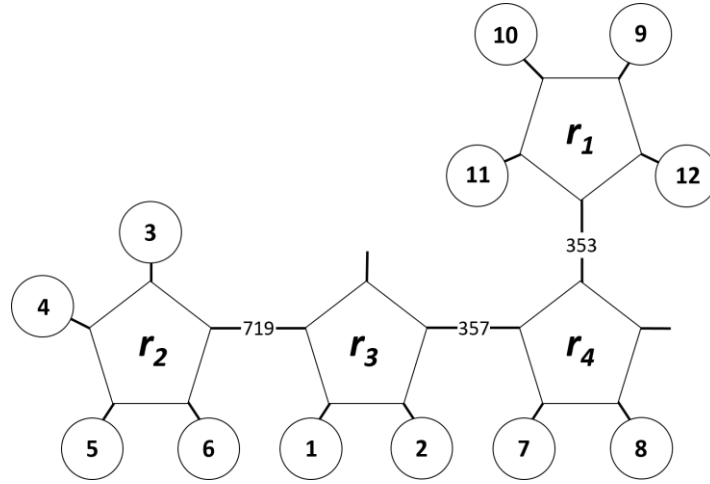
- [48] C. Santos, P. Vivet, J. P. Colonna, P. Coudrain, and R. Reis, “Thermal performance of 3D ICs: Analysis and alternatives,” in *2014 International 3D Systems Integration Conference (3DIC)*, **2014**, pp. 1–7.
- [49] T. Onagi, C. Sun, and K. Takeuchi, “Impact of through-silicon via technology on energy consumption of 3D-integrated solid-state drive systems,” in *2015 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC)*, **2015**, pp. 215–218.
- [50] A. Sheibanyrad, F. Ptrot, and A. Jantsch, *3D Integration for NoC-based SoC Architectures*, 1st ed. Springer Publishing Company, Incorporated, **2010**.
- [51] L. P. Carloni, P. Pande, and Y. Xie, “Networks-on-chip in emerging interconnect paradigms: Advantages and challenges,” in *2009 3rd ACM/IEEE International Symposium on Networks-on-Chip*, **2009**, pp. 93–102.



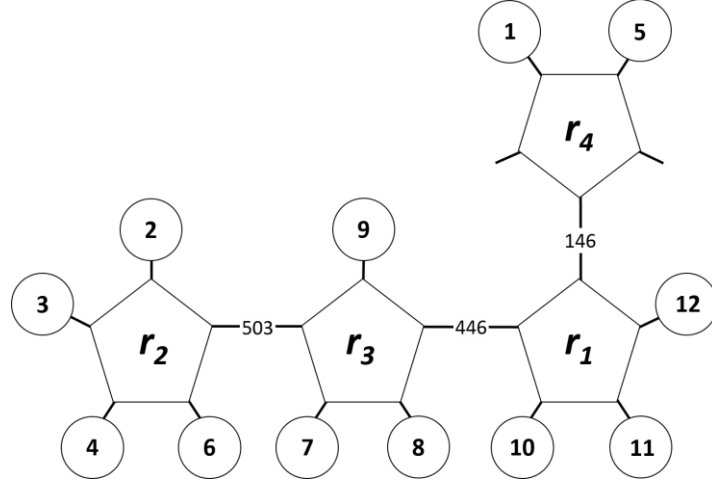
## 8. EKLER



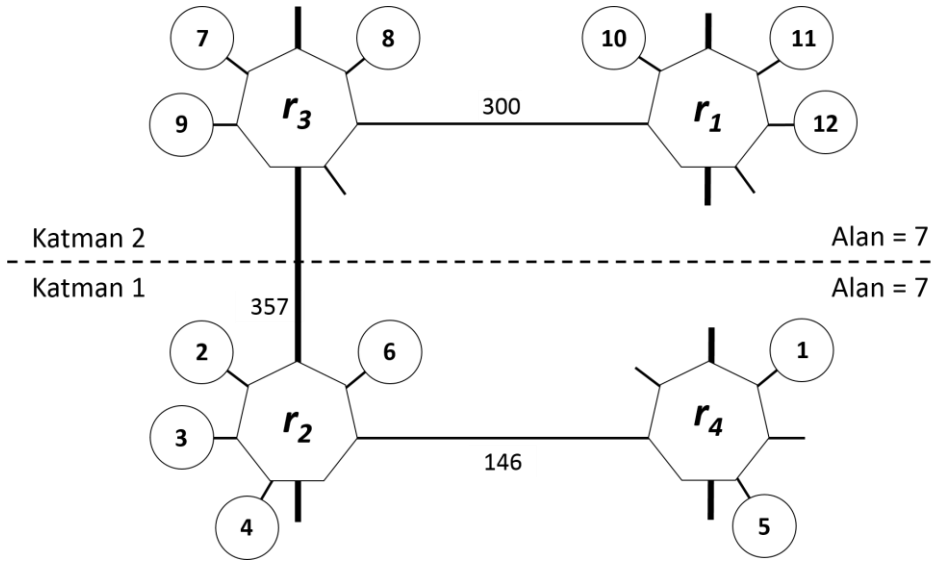
Şekil 8.1. VOPD\_12 uygulamasının iletişim çizgesi



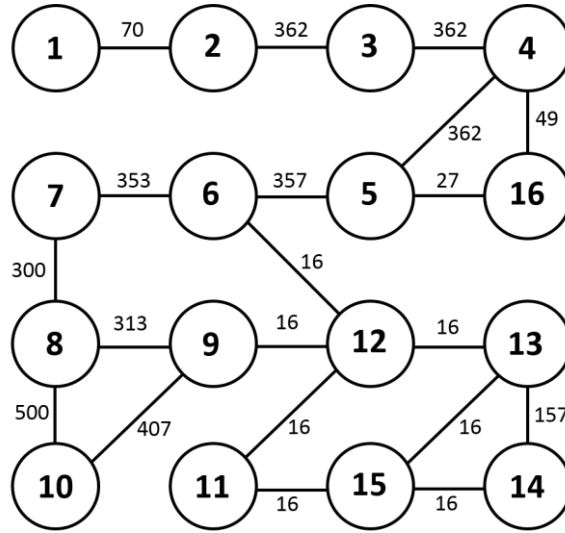
Şekil 8.2. VOPD\_12 uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



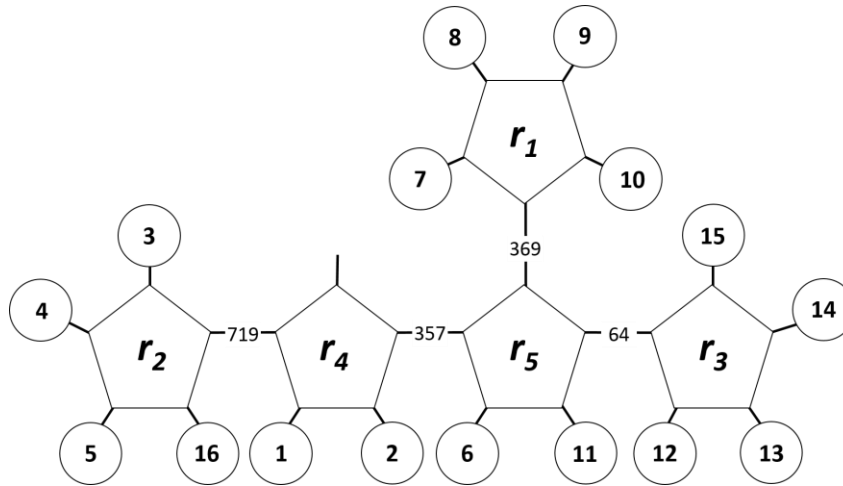
Şekil 8.3. VOPD\_12 uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



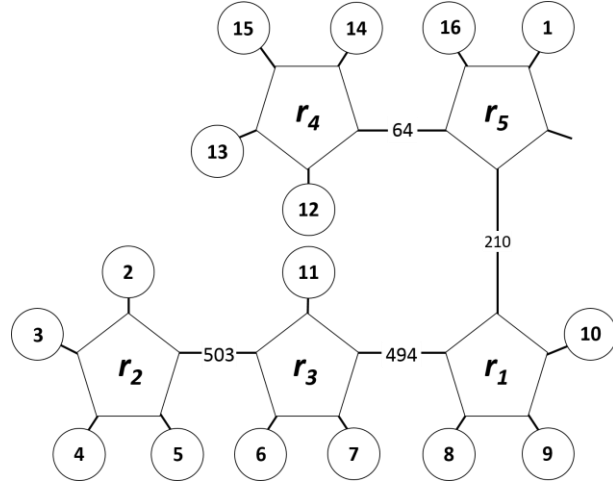
Şekil 8.4. VOPD\_12 uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi



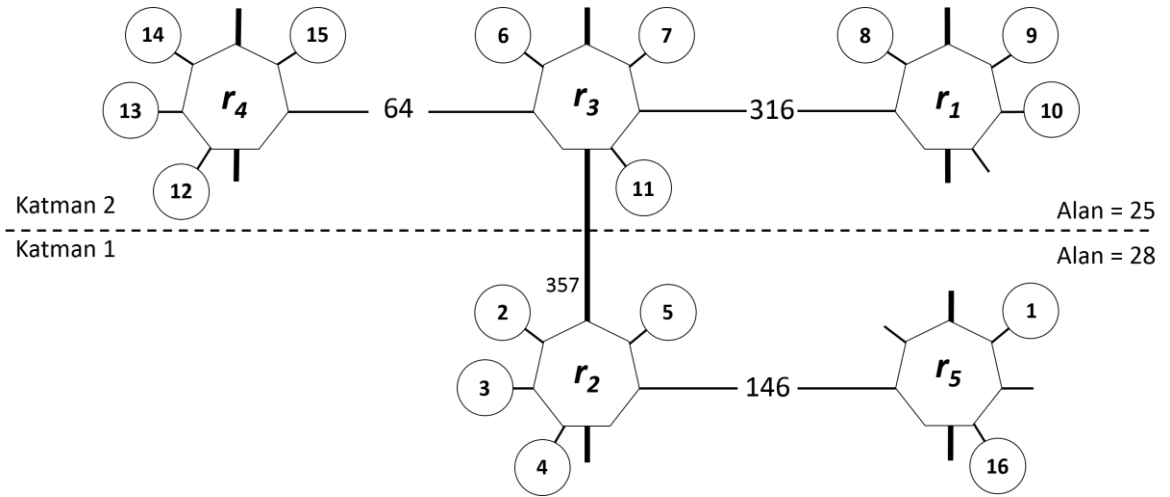
Şekil 8.5. VOPD\_16 uygulamasının iletişim çizgesi



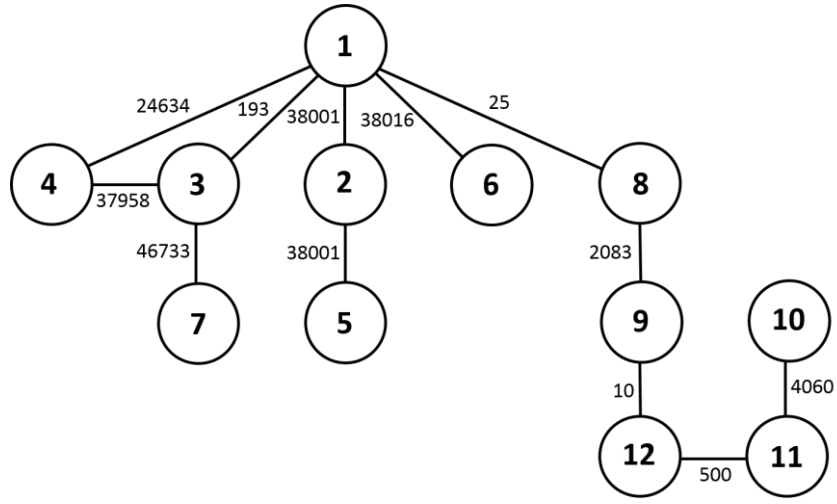
Şekil 8.6. VOPD\_16 uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



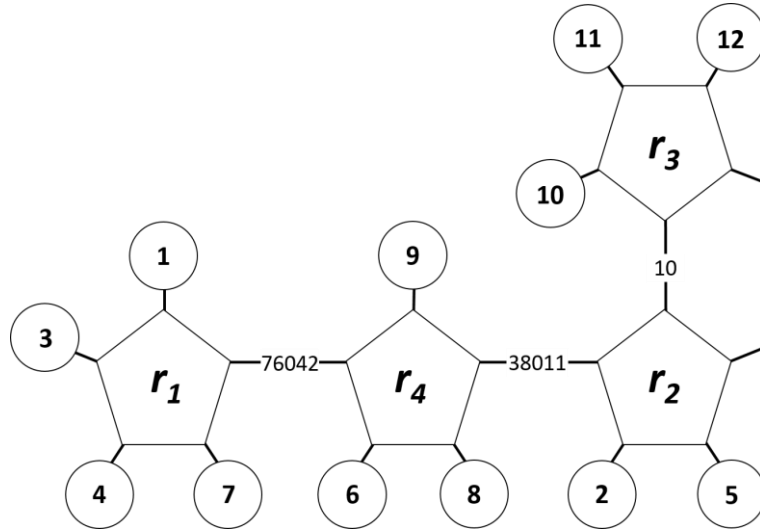
Şekil 8.7. VOPD\_16 uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topoloji eşlenmiş hali



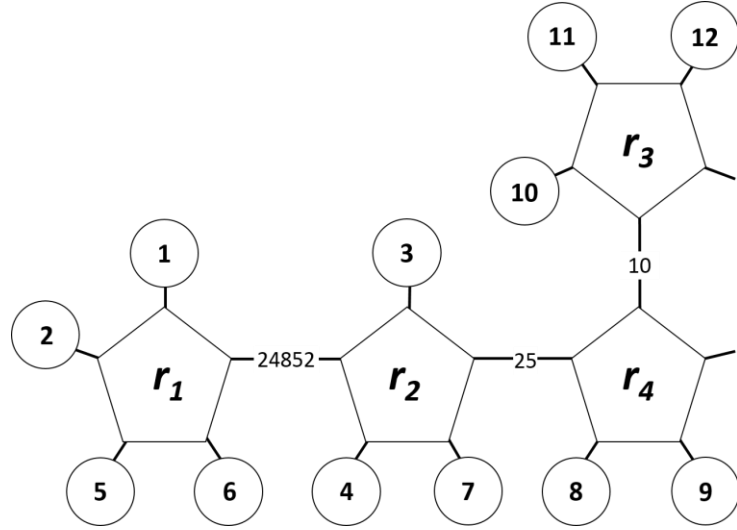
Şekil 8.8. VOPD\_16 uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi



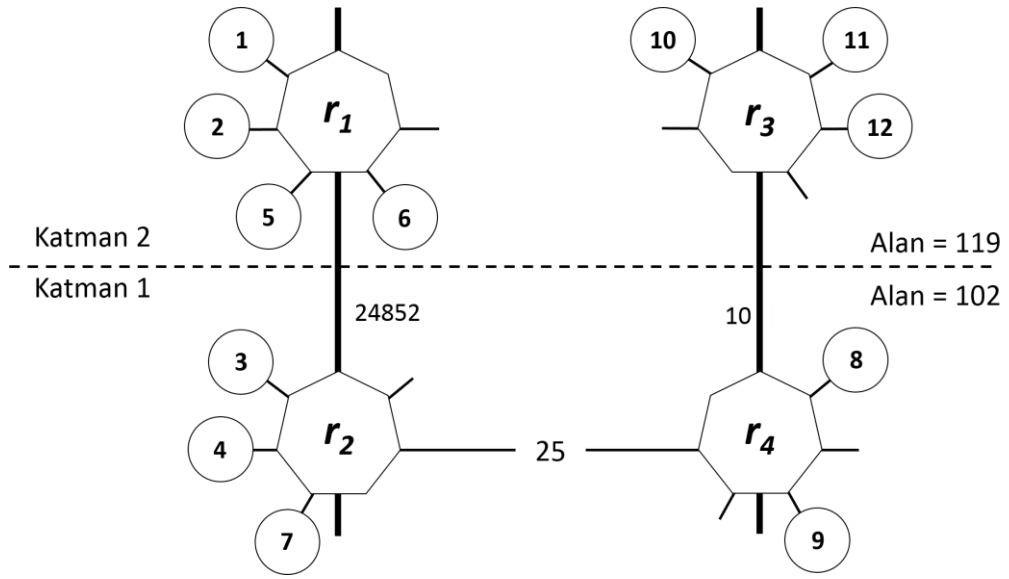
Şekil 8.9. 263mp3enc uygulamasının iletişim çizgesi



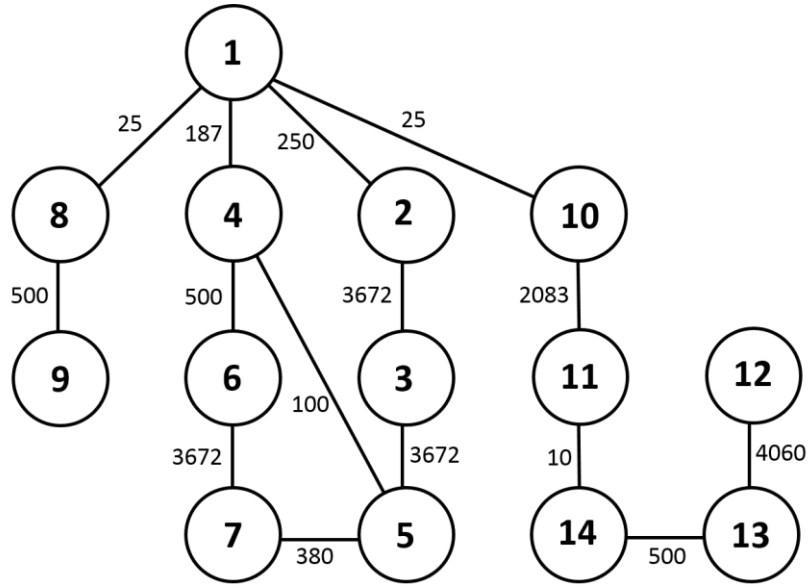
Şekil 8.10. 263mp3enc uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



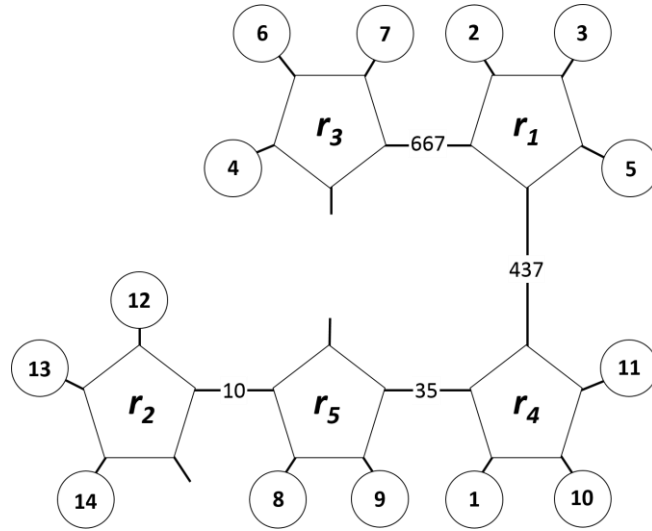
Şekil 8.11. 263mp3enc uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



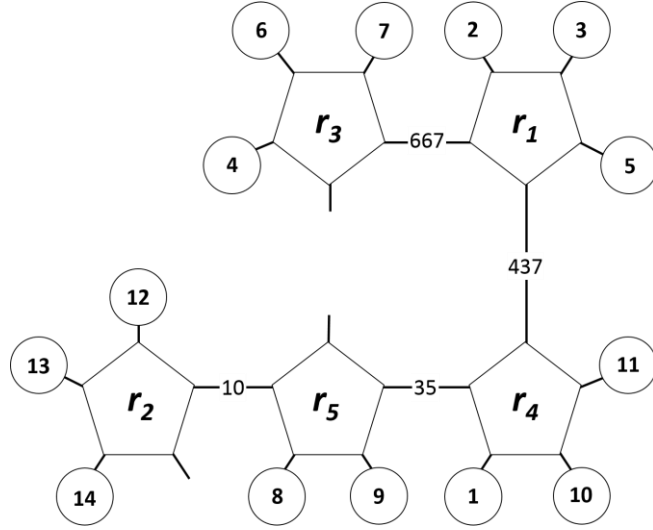
Şekil 8.12. 263mp3enc uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi



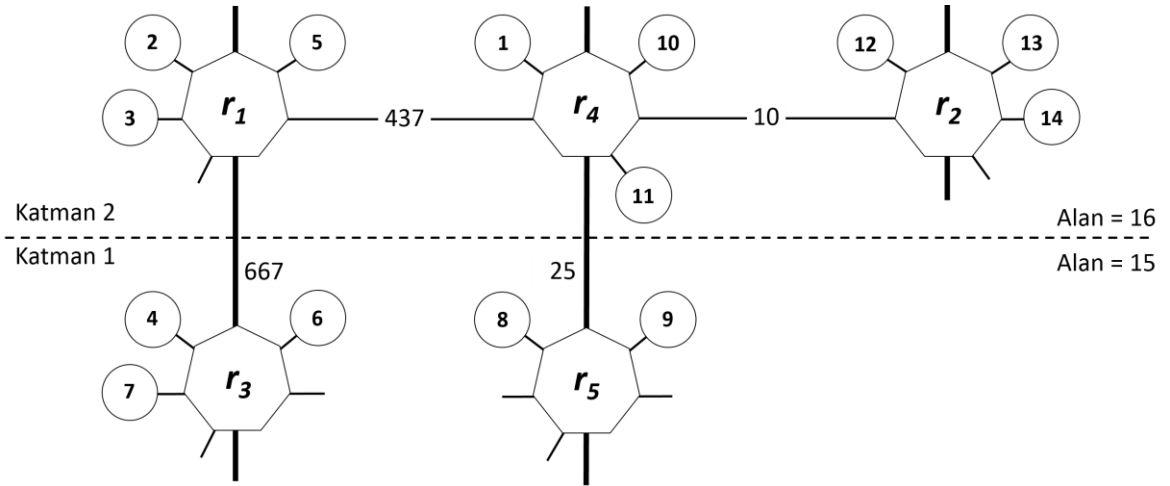
Şekil 8.13. 263mp3dec uygulamasının iletişim çizgesi



Şekil 8.14. 263mp3dec uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali

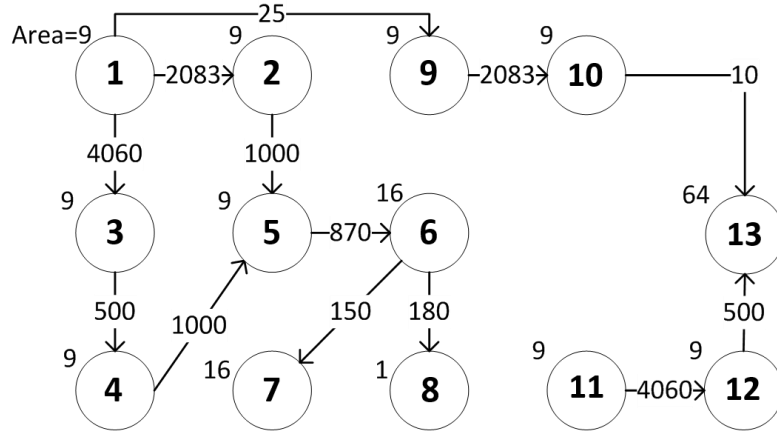


Şekil 8.15. 263mp3dec uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali

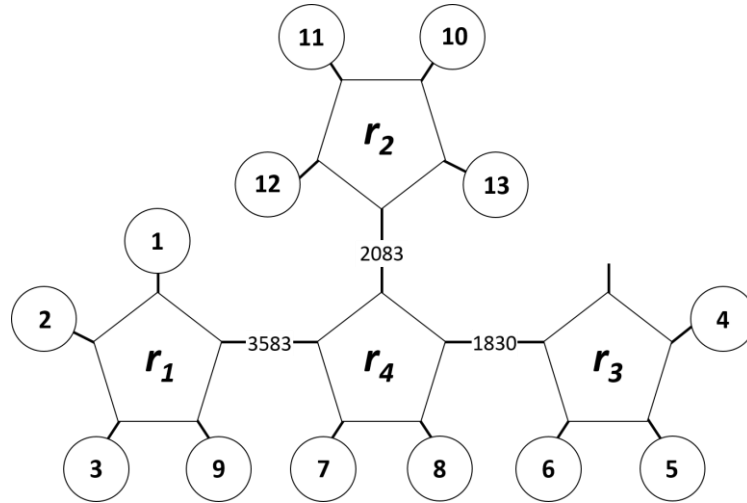


Şekil 8.16. 263mp3dec uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi

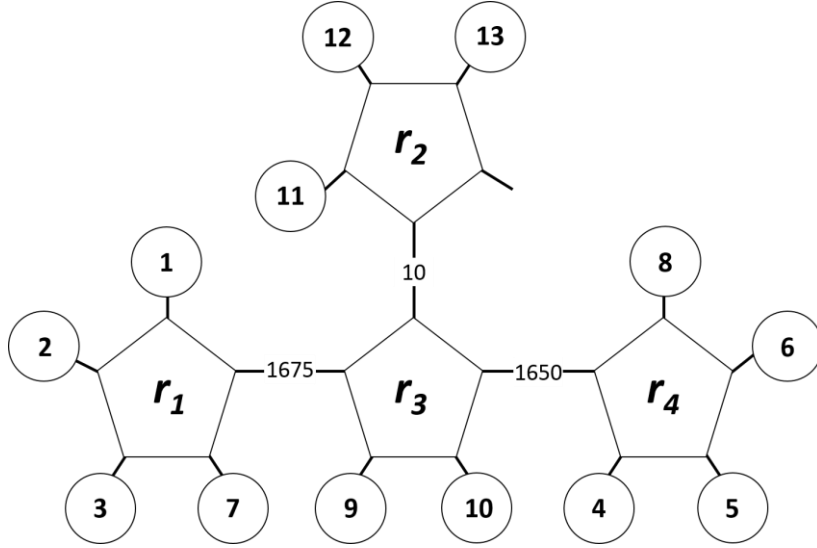




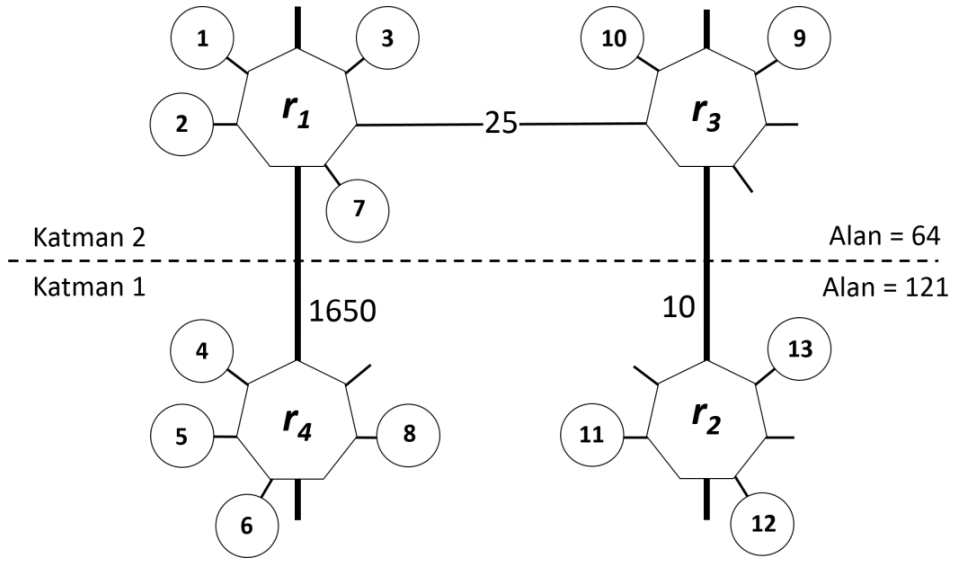
Şekil 8.17. Mp3 enc uygulamasının iletişim çizgesi



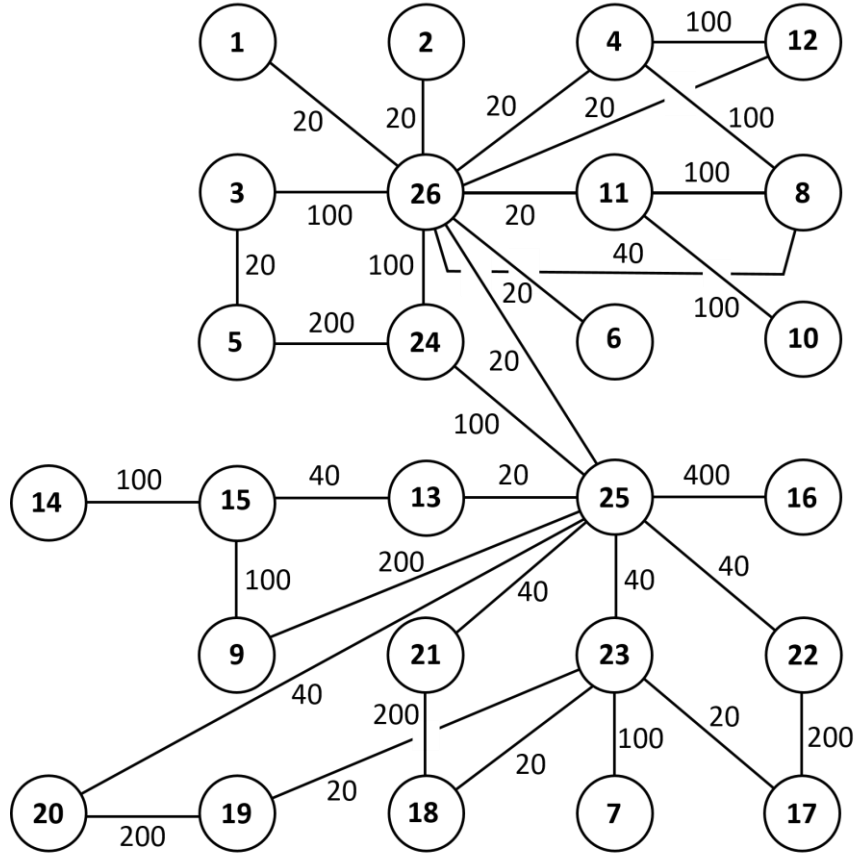
Şekil 8.18. Mp3 enc uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



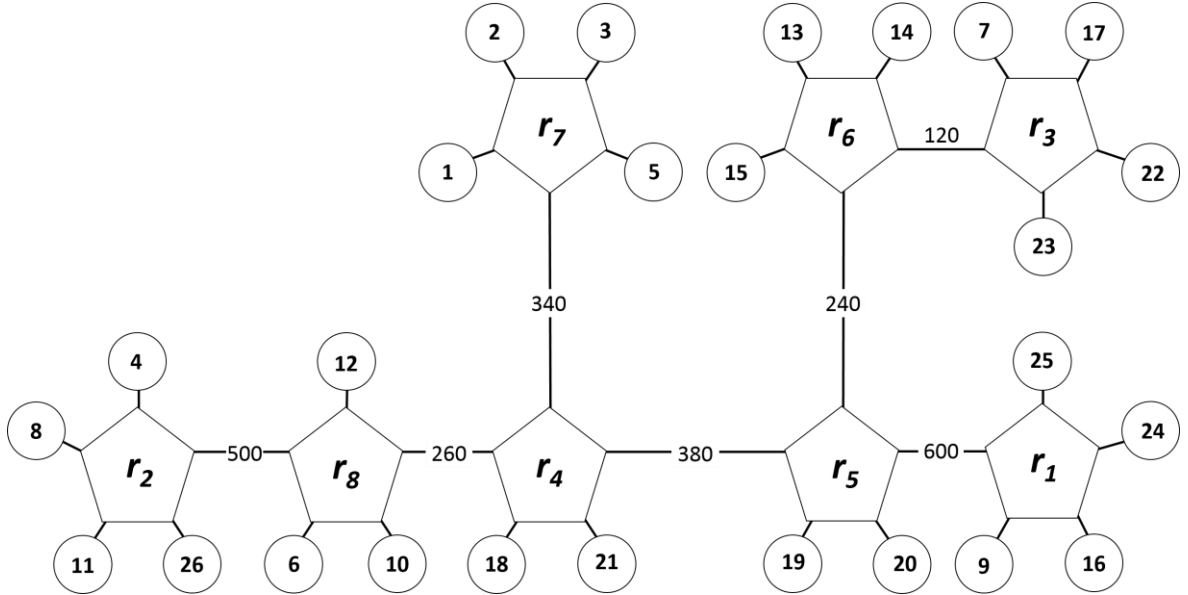
Şekil 8.19. Mp3 enc uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



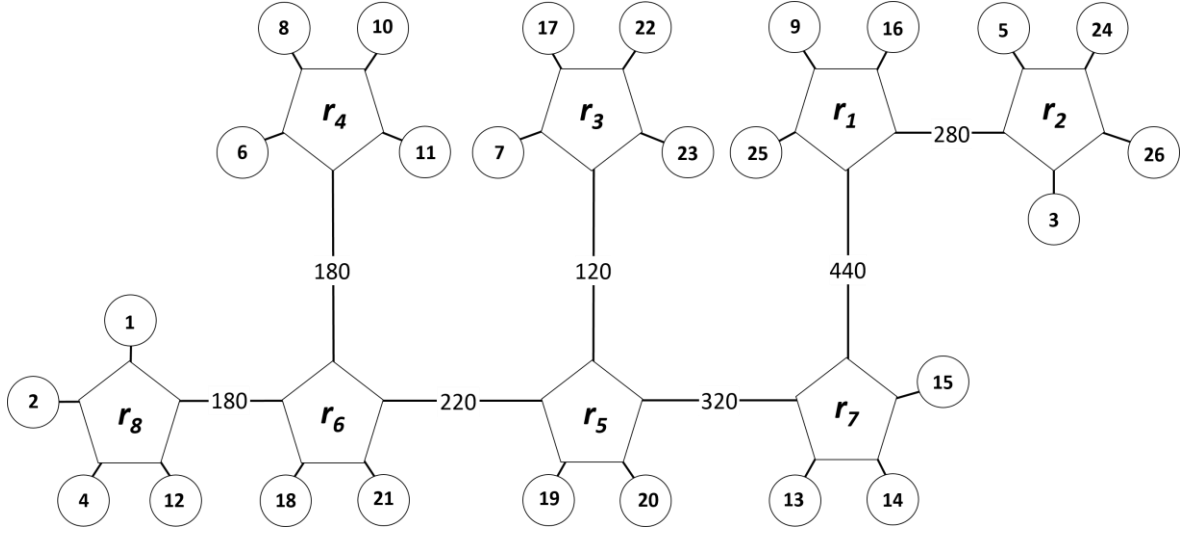
Şekil 8.20. Mp3 enc uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi



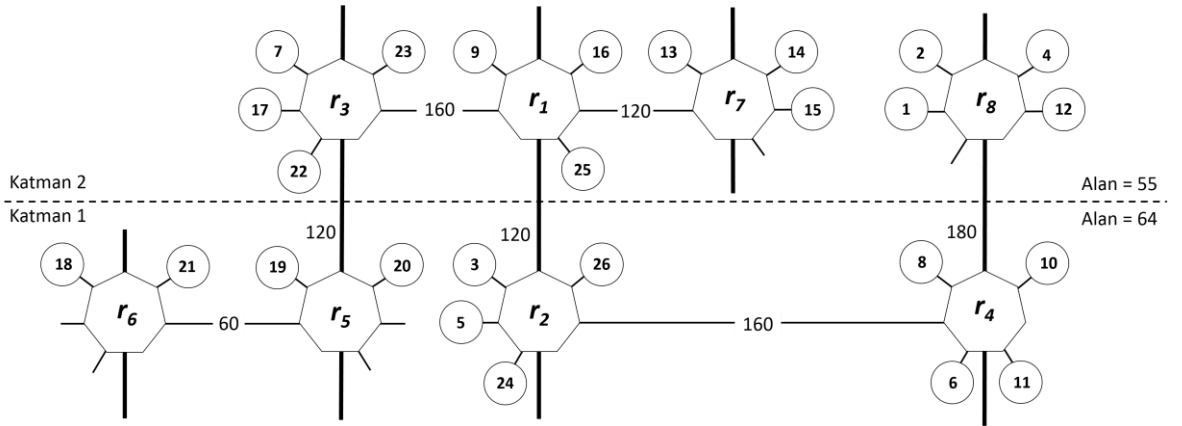
Şekil 8.21. D26\_media uygulamasının iletişim çizgesi



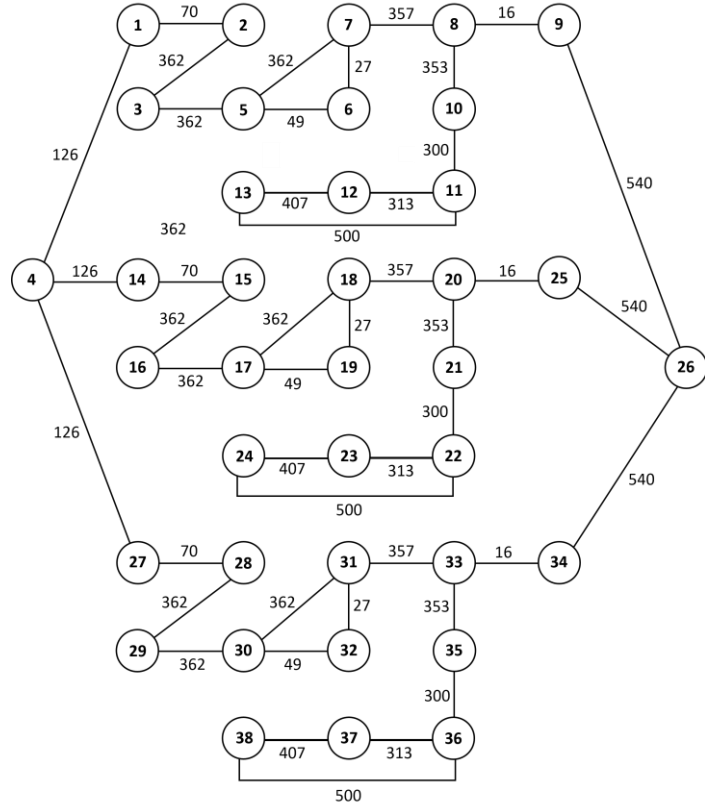
Şekil 8.22. D26\_media uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



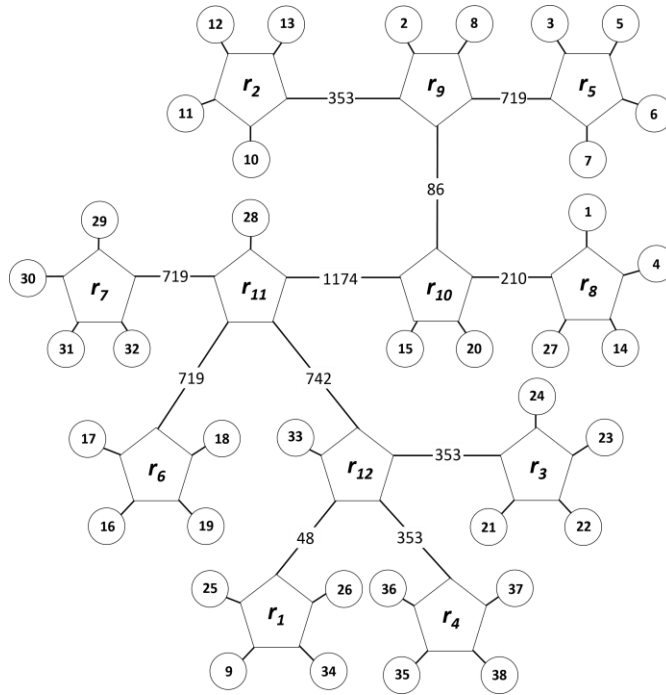
Şekil 8.23. D26\_media uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



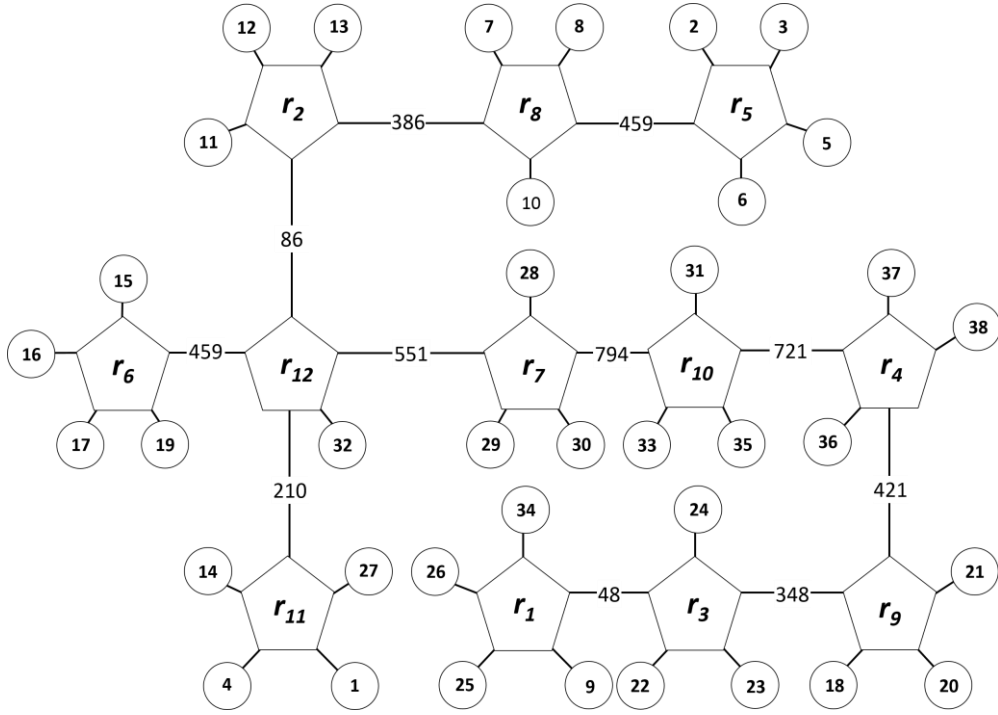
Şekil 8.24. D26\_media uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi



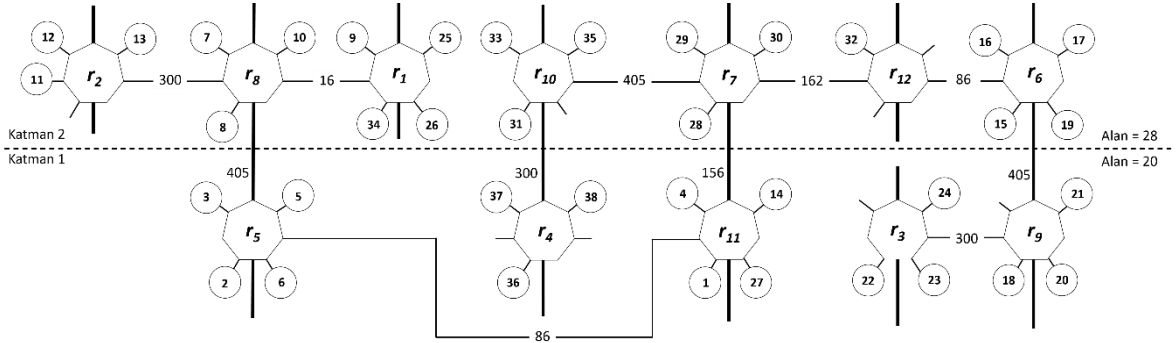
Şekil 8.25. D38\_tVOPD uygulamasının iletişim çizgesi



Şekil 8.26. D38\_tVOPD uygulaması için TopGen yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



Şekil 8.27. D38\_tVOPD uygulaması için TopGen 3D yönteminin oluşturduğu topolojiye eşlenmiş hali



Şekil 8.28. D38\_tVOPD uygulaması için TopGen 3D (2 katman) topoloji çizgesi

# ÖZGEÇMİŞ

## Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Arash BARZINMEHR

Doğum Yeri : TABRIZ, IRAN

Medeni Hali : Bekar

E-posta : ara-sh@live.com

Adresi : IRAN

## Eğitim

Lise : Abouzar (1997-2011)

Lisans : Daneshvaran Tabriz Yüksek Öğretim Kurumu (2005.09.11)

Yüksek Lisans: Hacettepe Üniversitesi Bilgisayar- Fen Bilimleri enstitüsü- Bilgisayar Mühendisliği Bölümü (2011-2017)

**Yabancı Dil ve Düzeyi:** İngilizce, Türkçe, Farsça

**İş Deneyimi:** PARSIAN TABRIZ reklam şirketi

**Deneyim Alanları:** Bilgisayar programlama, Web sitesi programlama ve tasarım

## Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

## Tezden Üretilmiş Yayınlar

## Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

BARZINMEHR, Arash; TOSUN, Süleyman, "Energy-Aware Application-Specific Topology Generation for 3D Network-on-Chips." In Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS), 2017 20th IEEE International Symposium on,



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 12/06/2017

Tez Başlığı / Konusu: ENERJİ VERİMLİ KULLANIMA ÖZEL 3D YONGA ÜSTÜ AĞ TASARIMI

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 78 sayfalık kısmına ilişkin 09/06/2017 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %3 'tür.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orjinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

12.06.2017

Adı Soyadı: ARASH BARZINMEHR  
Öğrenci No: N10325134  
Anabilim Dalı: BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ  
Programı:  
Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Süleyman Tosun  
(Unvan, Ad Soyad, İmza)