

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORTAK HEDEFLİ RÖLELİ TELSİZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE  
BİT VE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sinan ATAN**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Telekomünikasyon Mühendisliği Programı**

**OCAK 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ORTAK HEDEFLİ RÖLELİ TELSİZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE  
BİT VE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sinan ATAN  
504091396**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Telekomünikasyon Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ**

**OCAK 2015**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504091396 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Sinan ATAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ORTAK HEDEFLİ RÖLELİ TELSİZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE BİT VE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. İbrahim ALTUNBAŞ** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Yrd. Doç. Dr. Hacı İLHAN** .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **15 Aralık 2014**  
**Savunma Tarihi :**   **20 Ocak 2015**



*Aileme ve hayat arkadaşıma,*



## ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca birlikte çalıştığım, engin bilgi ve tecrübesinden faydalanarak iyi bir araştırmacı, haberleşme mühendisi olma hususunda ilgi ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen, özellikle de yüksek lisans eğitimine verdiğim aranın ertesinde geri dönmem noktasında destek olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ümit AYGÖLÜ'ne teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini her koşulda hissettiğim aileme ve yoğun iş tempoma rağmen tez çalışmasına motivasyonum noktasında akademik eğilimlerimi her durumda sıcak tutmama yardımcı olan; maddi, manevi her türlü desteği veren hayat arkadaşım Beste AKKUZU'ya minnettarım.

Son olarak çalışmakta olduğum Ericsson Araştırma ve Geliştirme A.Ş.'ye yüksek lisans eğitimim dolayısıyla sağladığı imkan ve kolaylıklar dolayısıyla teşekkür ederim.

Aralık 2014

Sinan ATAN  
Elektronik ve Haberleşme Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                       |      |
|-----------------------------------------------------------------------|------|
| ÖNSÖZ.....                                                            | vii  |
| İÇİNDEKİLER .....                                                     | ix   |
| KISALTMALAR .....                                                     | xi   |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                                                    | xiii |
| SEMBOL LİSTESİ .....                                                  | xv   |
| ÖZET.....                                                             | xvii |
| SUMMARY .....                                                         | xix  |
| 1. GİRİŞ .....                                                        | 1    |
| 1.1 Tezin Amacı .....                                                 | 2    |
| 1.2 Literatür Araştırması .....                                       | 2    |
| 1.3 Tezin Literatüre Katkısı.....                                     | 3    |
| 2. İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM SİSTEMLERİ.....                                | 5    |
| 2.1 Röle Çeşitlerine Göre Sistem Yapıları .....                       | 5    |
| 2.1.1 Aktif röleli sistemler .....                                    | 5    |
| 2.1.2 Pasif röleli sistemler.....                                     | 6    |
| 2.2 Sistem Yapılarına Göre İşbirlikli İletişim Teknikleri .....       | 7    |
| 2.2.1 İki yönlü röleli sistemler .....                                | 7    |
| 2.2.2 Genelleştirilmiş sistem .....                                   | 8    |
| 2.3 İşbirlikli İletişim Sistemlerinde Röle Aktarım Teknikleri .....   | 9    |
| 2.3.1 Kuvvetlendir ve aktar .....                                     | 9    |
| 2.3.2 Çöz ve aktar .....                                              | 10   |
| 2.3.3 Seçici çöz ve aktar.....                                        | 11   |
| 2.3.4 Akıllı çöz ve aktar .....                                       | 13   |
| 2.4 İşbirlikli İletişim Sistemlerinde İletim Ortamının Kullanımı..... | 15   |
| 2.4.1 Geleneksel yapı .....                                           | 15   |
| 2.4.2 Ağ katmanı kodlaması .....                                      | 17   |
| 2.4.3 Fiziksel katman ağ kodlaması .....                              | 19   |
| 3. KARMAŞIK DÜZLEM AĞ KODLAMASI ve İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM.....           | 23   |
| 3.1 Genel Sistem Yapıları .....                                       | 23   |
| 3.1.1 Rölede kuvvetlendir ve aktar yöntemi .....                      | 25   |
| 3.1.2 Rölede akıllı sez ve aktar yöntemi .....                        | 26   |
| 3.1.3 Rölede seçici çöz ve aktar yöntemi.....                         | 27   |
| 3.2 Başarım Analizi .....                                             | 29   |
| 3.3 Benzetim Sonuçları .....                                          | 32   |
| 4. İKİ YÖNLÜ RÖLELİ SİSTEMLER VE İLETİM SIĞASI .....                  | 35   |
| 4.1 Ayrık – Zamanlı Çöz ve Aktar Yöntemi.....                         | 38   |
| 4.1.1 Sistem yapısı .....                                             | 38   |
| 4.1.2 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği .....                   | 39   |
| 4.1.3 Enerji verimliliği .....                                        | 42   |
| 4.2 Eş – Zamanlı Çöz ve Aktar Yöntemi .....                           | 43   |
| 4.2.1 Sistem yapısı .....                                             | 43   |

|                                                                      |            |
|----------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği.....                   | 43         |
| 4.2.3 Enerji verimliliği .....                                       | 47         |
| 4.3 Eş – Zamanlı Kuvvetlendir ve Aktar Yöntemi.....                  | 47         |
| 4.3.1 Sistem yapısı .....                                            | 47         |
| 4.3.2 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği.....                   | 48         |
| 4.3.3 Enerji verimliliği .....                                       | 50         |
| 4.4 Benzetim Sonuçları .....                                         | 51         |
| <b>5. ORTAK HEDEFLİ SİSTEMLER VE İLETİM SIĞASI.....</b>              | <b>57</b>  |
| 5.1 Ayrık – Zamanlı İletişim .....                                   | 57         |
| 5.1.1 Sistem yapısı .....                                            | 58         |
| 5.1.2 Protokol – 1 .....                                             | 59         |
| 5.1.2.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği.....                 | 61         |
| 5.1.2.2 Enerji verimliliği .....                                     | 64         |
| 5.1.3 Protokol - 2.....                                              | 65         |
| 5.1.3.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği.....                 | 66         |
| 5.1.3.2 Enerji verimliliği .....                                     | 68         |
| 5.2 Eş – Zamanlı İletişim.....                                       | 69         |
| 5.2.1 Sistem yapısı .....                                            | 70         |
| 5.2.2 Protokol – 3.....                                              | 71         |
| 5.2.2.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği.....                 | 72         |
| 5.2.2.2 Enerji verimliliği .....                                     | 75         |
| 5.2.3 Protokol – 4.....                                              | 76         |
| 5.2.3.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği.....                 | 77         |
| 5.2.3.2 Enerji verimliliği .....                                     | 79         |
| 5.2.4 Protokol – 5.....                                              | 80         |
| 5.2.4.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği.....                 | 80         |
| 5.2.4.2 Enerji verimliliği .....                                     | 82         |
| 5.2.5 Protokol – 6.....                                              | 83         |
| 5.2.5.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği.....                 | 84         |
| 5.2.5.2 Enerji verimliliği .....                                     | 86         |
| 5.3 Serbest Uzay Yol Kaybının Sistem Başarımına Etkisi.....          | 87         |
| 5.3.1 Yaklaşım 1 – iki yönlü ve ortak hedefli röleli sistemler ..... | 87         |
| 5.3.2 Yaklaşım 2 – röle konumunun sistem başarımına etkisi.....      | 89         |
| 5.4 Benzetim Sonuçları .....                                         | 90         |
| <b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                                     | <b>115</b> |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                | <b>119</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                    | <b>123</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                 | <b>131</b> |

## KISALTMALAR

|             |                                        |                                  |
|-------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| <b>ACK</b>  | : Acknowledgement Signal               | Onay İşareti                     |
| <b>AF</b>   | : Amplify and Forward                  | Kuvvetlendir ve Aktar            |
| <b>ARQ</b>  | : Automatic Repeat Request             | Otomatik Yineleme İsteme         |
| <b>AWGN</b> | : Additive White Gaussian Noise        | Toplamsal Beyaz Gauss Gürültüsü  |
| <b>BC</b>   | : Broadcast Phase                      | Yayın Fazı                       |
| <b>BER</b>  | : Bit Error Rate                       | Bit Hata Olasılığı               |
| <b>BPSK</b> | : Binary Phase Shift Keying            | İkili Faz Kaydırmalı Anahtarlama |
| <b>CFNC</b> | : Complex Field Network Coding         | Karmaşık Düzlem Ağ Kodlaması     |
| <b>CSI</b>  | : Channel State Information            | Kanal Durum Bilgisi              |
| <b>CRC</b>  | : Cyclic Redundancy Check              | Çevrimsel Artıklık Denetimi      |
| <b>DF</b>   | : Decode and Forward                   | Çöz ve Aktar                     |
| <b>DL</b>   | : Download                             | Aşağı Yönlü İletişim             |
| <b>FEC</b>  | : Forward Error Correction             | İleri Yönde Hata Düzeltme        |
| <b>GFNC</b> | : Galois Field Network Coding          | Ağ Kodlaması                     |
| <b>LDPC</b> | : Low-Density Parity-Check             | Düşük Yoğunluklu Eşlik Denetimi  |
| <b>LOS</b>  | : Line of Sight                        | Doğrudan Görüş                   |
| <b>MAC</b>  | : Multiple Access Phase                | Çoklu Erişim Fazı                |
| <b>Mbps</b> | : Megabits Per Second                  | Saniyede Aktarılan Bit Sayısı    |
| <b>MIMO</b> | : Multiple-Input Multiple-Output       | Çoklu-Giriş Çoklu-Çıkış          |
| <b>MISO</b> | : Multiple-Input Single-Output         | Çoklu-Giriş Tek-Çıkış            |
| <b>ML</b>   | : Maximum Likelihood                   | En Büyük Olabilirlik             |
| <b>MRC</b>  | : Maximum Ratio Combining              | En Büyük Oran Birleştirmesi      |
| <b>NACK</b> | : Negative-Acknowledgement Signal      | Red İşareti                      |
| <b>PNC</b>  | : Physical Layer Network Coding        | Fiziksel Katman Ağ Kodlaması     |
| <b>R</b>    | : Relay                                | Röle                             |
| <b>SCTP</b> | : Stream Control Transmission Protocol | Akış Denetimli İletim Protokolü  |
| <b>SDF</b>  | : Selective Decode and Forward         | Seçici Çöz ve Aktar              |
| <b>SER</b>  | : Symbol Error Rate                    | Simge Hata Olasılığı             |
| <b>SIMO</b> | : Single-Input Multiple-Output         | Tek-Giriş Çoklu-Çıkış            |
| <b>SNC</b>  | : Straightforward Network Coding       | Ağ Kodlaması                     |
| <b>SNR</b>  | : Signal to Noise Ratio                | İşaret Gürültü Oranı             |
| <b>T</b>    | : Terminal                             | Terminal                         |
| <b>TCP</b>  | : Transmission Control Protocol        | İletim Kontrol Protokolü         |
| <b>TS</b>   | : Traditional Scheme                   | Geleneksel İletişim Yapısı       |
| <b>TWRN</b> | : Two Way Relay Networks               | İki Yönlü Röleli Ağlar           |
| <b>UDP</b>  | : User Datagram Protocol               | Kullanıcı Datagram Protokolü     |
| <b>XOR</b>  | : Exclusive Or                         | Modülo İki Toplam                |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 2.1 : İşbirlikli iletişim sistemlerinde pasif röleler .....                                     | 6   |
| Şekil 2.2 : İki yönlü röleli sistemler. ....                                                          | 7   |
| Şekil 2.3 : İşbirlikli iletişim genelleştirilmiş sistem yapısı.....                                   | 8   |
| Şekil 2.4 : Kuvvetlendir ve aktar yöntemi. ....                                                       | 9   |
| Şekil 2.5 : Çöz ve aktar yöntemi.....                                                                 | 11  |
| Şekil 2.6 : Akıllı çöz ve aktar yöntemi. ....                                                         | 13  |
| Şekil 2.7 : Klasik işbirlikli sistem.....                                                             | 16  |
| Şekil 2.8 : Ağ kodlamalı sistem yapısı. ....                                                          | 18  |
| Şekil 2.9 : İki yönlü röleli sistemlerde fiziksel katman ağ kodlaması. ....                           | 20  |
| Şekil 3.1 : İki kullanıcı için karmaşık düzlem ağ kodlamalı sistem yapısı.....                        | 23  |
| Şekil 3.2 : İşbirlikli iletişim sistemlerinde karmaşık düzlem ağ kodlaması<br>bit hata başarımı. .... | 32  |
| Şekil 4.1 : İki yönlü röleli sistem yapısı. ....                                                      | 35  |
| Şekil 4.2 : Ayrık – zamanlı çöz ve aktar yöntemi için Markov zinciri.....                             | 40  |
| Şekil 4.3 : Eş – zamanlı çöz ve aktar yöntemi için Markov zinciri. ....                               | 45  |
| Şekil 4.4 : Eş – zamanlı kuvvetlendir ve aktar yöntemi için Markov zinciri. ....                      | 49  |
| Şekil 4.5 : Farklı iletim hızlarında bit iletim verimliliği.....                                      | 52  |
| Şekil 4.6 : Farklı iletim hızlarında normalize bit iletim verimliliği.....                            | 53  |
| Şekil 4.7 : Farklı işaret - gürültü oranlarında normalize bit iletim verimliliği. ....                | 54  |
| Şekil 4.8 : Farklı iletim hızlarında enerji verimliliği. ....                                         | 55  |
| Şekil 5.1 : Ayrık – zamanlı iletişim sistem yapısı. ....                                              | 58  |
| Şekil 5.2 : Protokol – 1 için Markov zinciri. ....                                                    | 61  |
| Şekil 5.3 : Protokol – 2 için Markov zinciri. ....                                                    | 67  |
| Şekil 5.4 : Eş – zamanlı iletişim sistem yapısı. ....                                                 | 70  |
| Şekil 5.5 : Protokol – 3 için Markov zinciri. ....                                                    | 73  |
| Şekil 5.6 : Protokol – 4 için Markov zinciri. ....                                                    | 78  |
| Şekil 5.7 : Protokol – 5 için Markov zinciri. ....                                                    | 81  |
| Şekil 5.8 : Protokol – 6 için Markov zinciri. ....                                                    | 85  |
| Şekil 5.9 : Genelleştirilmiş iletişim sistemi düğüm uzaklıkları. ....                                 | 88  |
| Şekil 5.10 : Ortak hedefli röleli sistemlerde rölenin konumlandırılması. ....                         | 90  |
| Şekil 5.11 : Ortak hedefli röleli sistem protokolleri için bit iletim verimliliği,<br>SNR=10 dB. .... | 91  |
| Şekil 5.12 : Ortak hedefli röleli sistem protokolleri için enerji verimliliği,<br>SNR=10 dB. ....     | 92  |
| Şekil 5.13 : Bit iletim verimliliği. ....                                                             | 94  |
| Şekil 5.14 : $R'$ 'ye bağlı normalize bit iletim verimliliği. ....                                    | 98  |
| Şekil 5.15 : SNR'a bağlı normalize bit iletim verimliliği.....                                        | 100 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil 5.16 :</b> Enerji verimliliği. ....                                                                              | 102 |
| <b>Şekil 5.17 :</b> Serbest uzay yol kaybı altında bit iletim verimliliği. ....                                           | 105 |
| <b>Şekil 5.18 :</b> Serbest uzay yol kaybı altında $R$ 'ye bağlı normalize bit iletim verimliliği. ....                   | 107 |
| <b>Şekil 5.19 :</b> Serbest uzay yol kaybı altında SNR'a bağlı normalize bit iletim verimliliği. ....                     | 108 |
| <b>Şekil 5.20 :</b> Serbest uzay yol kaybı altında enerji verimliliği. ....                                               | 110 |
| <b>Şekil 5.21 :</b> Ortak hedefli röleli sistem protokolleri için röle konumunun başarıma etkisi, $R=2$ (bit/sn/Hz). .... | 112 |
| <b>Şekil 5.22 :</b> Ortak hedefli röleli sistem protokolleri için röle konumunun başarıma etkisi, $R=4$ (bit/sn/Hz). .... | 113 |

## SEMBOL LİSTESİ

|                    |                                                                 |                                                                           |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$           | : Power Scaling Factor at Relay,<br>Path Loss Coefficient       | Röledeki Kuvvetlendirme Katsayısı,<br>Serbest Uzay Yol Kaybı Katsayısı    |
| $\beta$            | : Power Scaling Factor at Relay for<br>Amplify – and – Forward  | Kuvvetlendir – ve – Aktar Tekniği<br>için Röle Kuvvetlendirme Katsayısı   |
| $\theta_i$         | : Precoding Coefficient for Node $i$                            | $i$ Düğümünün Ön Kodlama Katsayısı                                        |
| $\gamma$           | : Instantaneous Signal to Noise Ratio                           | Anlık İşaret Gürültü Oranı                                                |
| $\bar{\gamma}$     | : Average Signal to Noise Ratio                                 | Ortalama İşaret Gürültü Oranı                                             |
| $\gamma_{ij}$      | : Signal to Noise Ratio in Channel<br>Between Nodes $i$ and $j$ | $i$ ve $j$ Dğümleri Arasındaki Kanalda<br>İşaret Gürültü Oranı            |
| $\gamma_{ij}^{th}$ | : SNR Threshold of Service Outage<br>Between Nodes $i$ and $j$  | $i$ ve $j$ Dğümleri Arasında Servis<br>Kesilme Durumu SNR Eşiği           |
| $\eta$             | : Goodput                                                       | Bit İletim Verimliliği                                                    |
| $\sigma_n^2$       | : Variance of Noise                                             | Gürültü Değişintisi                                                       |
| $\sigma_{ij}^2$    | : Variance of Channel Between<br>Nodes $i$ and $j$              | $i$ ve $j$ Dğümleri Arasındaki Kanalin<br>Değişintisi                     |
| $p_{out}$          | : Probability of Service Outage                                 | Servis Dışı Kalma Olasılığı                                               |
| $A_x$              | : Cardinality of $x$ Symbols                                    | Modülasyonlu $x$ İşaretlerinin Seçilim<br>Kümesinin Eleman Sayısı         |
| $C_{ij}$           | : Channel Capacity Between $i$ and $j$<br>Nodes                 | $i$ ve $j$ Dğümleri Arasındaki Kanal<br>Sığıası                           |
| $C_s$              | : System Capacity                                               | Sistem Sığıası                                                            |
| $d_{min}$          | : Minimum Euclidean Distance                                    | En Küçük Öklid Uzaklığı                                                   |
| $d_{max}$          | : Maximum Euclidean Distance                                    | En Büyük Öklid Uzaklığı                                                   |
| $E[.]$             | : Expectation operator                                          | Beklenen Değer Operatörü                                                  |
| $E(s_i)$           | : Energy Consumption for Memory<br>State $i$                    | $i$ Bellek Durumu için Enerji<br>Tüketimi                                 |
| $E_b$              | : Energy Consumption Per<br>Successfully Transmitted Bit        | Başarılı İletilen Her Bir Bit İçin<br>Harcanan Enerji Miktarı             |
| $G_c$              | : Coding Gain                                                   | Kodlama Kazancı                                                           |
| $G_d$              | : Diversity Gain                                                | Çeşitleme Kazancı                                                         |
| $h_{i,j}$          | : Channel Fading Coefficient<br>Between $i$ and $j$ Nodes       | $i$ ve $j$ Dğümleri Arasındaki Kanal<br>Sönümleme Katsayısı (Yavaş Kanal) |
| $I[m]$             | : Successful Decoding Event<br>Function at Destination          | Hedefte Doğru Çözme Durum<br>Fonksiyonu                                   |
| $M$                | : Number of Relays                                              | Röle Sayısı                                                               |
| $N$                | : Number of Terminals                                           | Kaynak Sayısı                                                             |
| $N_0$              | : Noise Power Spectral Density                                  | Gürültünün Tek Yönlü Güç Spektral<br>Yoğunluğu                            |

|                   |                                                                                    |                                                                                        |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| $N_f$             | : Frame Length                                                                     | Çerçeve Uzunluğu                                                                       |
| $n_{ij}$          | : Noise Term for Transmission Between nodes $i$ and $j$                            | $i$ ve $j$ Düğümleri Arasındaki İletişim için Gürültü Terimi                           |
| $p(s_i)$          | : Probability of Memory State $s_i$                                                | $s_i$ Bellek Durumunun Olasılığı                                                       |
| $P_i$             | : Transmitting Power of Node $i$                                                   | $i$ Düğümünün İletim Gücü                                                              |
| $P_{tot}$         | : System's Total Energy Consumption For a Cycle                                    | Bir Çevrimlik İletişim Sonunda Sistem Tarafından Tüketilen Ortalama Enerji             |
| $p_{0,10,01,1}$   | : Probability of Subscripted Memory State Transition                               | 0, 10, 01 ve 1 Bellek Durumlarına Geçme Olasılığı                                      |
| $p_{0,10,01,1}^i$ | : Probability of Subscripted Memory State Transition for node $i$                  | $i$ Düğümü için 0, 10, 01 ve 1 Bellek Durumlarına Geçme Olasılığı                      |
| $p_{A,B,C,D}$     | : Cascade Outage Probability at Destination for T <sub>i</sub> -D and R-D links    | T <sub>i</sub> -D, R-D Kanallarına İlişkin Hedefteki Kaskat S.Dışı Kal. Ol.            |
| $p_{ij}$          | : Outage Probability Between Nodes $i$ and $j$                                     | $i$ ve $j$ Düğümleri Arasındaki İletişim için Servis Dışı Kalma Olasılığı              |
| $p_{RD}^i$        | : Outage Probability at R-D in case Relay only Transmits Symbols of T <sub>i</sub> | Röle Yalnızca T <sub>i</sub> 'nin İşaretini İlettiği Durumda R-D Arası S.Dışı Kal. Ol. |
| $p_c$             | : Successful Decoding Probability                                                  | Doğru Çözme Olasılığı                                                                  |
| $p_e$             | : Erroneous Decoding Probability                                                   | Hatalı Çözme Olasılığı                                                                 |
| $R$               | : Transmission Rate                                                                | İletim Hızı                                                                            |
| $R^{th}$          | : Outage Threshold of Rate                                                         | Hız için Servis Dışı Kalma Eşiği                                                       |
| $S_i$             | : Memory State $i$                                                                 | $i$ Bellek Durumu                                                                      |
| $t$               | : Time Variable                                                                    | Zaman Değişkeni                                                                        |
| $T$               | : Transmission Period                                                              | Her İşaret için İletim Periyodu                                                        |
| $u$               | : Joint Symbol of Cooperating Terminals                                            | İşbirlikli Kaynak Birimlerinin Birleştirilmiş Simge İşareti                            |
| $x_{a,b}$         | : Possible Values of $x$ Symbols Selected within $A_x$                             | $A_x$ Kümesinden Seçilen Olası $x$ Simgeleri                                           |
| $x_i$             | : Modulated Terminal Symbols of Node $i$                                           | $i$ Düğümünün Modülasyonlu Bilgi İşareti                                               |
| $\hat{x}_i^j$     | : Estimation of Node $i$ Symbols at Node $j$                                       | $i$ Düğümünün İşaretlerinin $j$ Düğümündeki Kestirimi                                  |
| $x_e$             | : Erroneous Decoded Symbols                                                        | Hatalı Çözülmüş Simge                                                                  |
| $y_i$             | : Received Signal by Node $i$                                                      | $i$ Düğümünün Aldığı İşaret                                                            |
| $y_i^j$           | : Received Signal by Node $i$ in Time Slot $j$                                     | $i$ Düğümünün $j$ Zaman Aralığında Aldığı İşaret                                       |
| $\bar{z}$         | : Expected Value of Variable $z$                                                   | $z$ Değişkeninin Beklenen Değeri                                                       |
| $\mathbf{z}$      | : Vector of Variable $z$                                                           | $z$ Değişkeni Vektörü                                                                  |
| $\mathbf{Z}$      | : Matrix of Variable $z$                                                           | $z$ Değişkeni Matrisi                                                                  |

## ORTAK HEDEFLİ RÖLELİ TELSİZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE BİT VE ENERJİ VERİMLİLİĞİ ANALİZİ

### ÖZET

Teknolojinin hızla ilerlemesine bağlı olarak daha küçük boyutlardaki donanımların işlem sığasının önemli ölçüde artmasıyla telsiz iletişim sistemlerinde karmaşıklığı daha yüksek, fakat başarımı çok daha iyi yöntemlerin kullanılması mümkün olmuştur. Dolayısıyla 90'lı yıllarda önerilen yüksek başarımli kanal kodlama teknikleri 2000'lerde pratik olarak gerçekleştirilebilir hale gelmiştir. Seleflerine göre kanal sığasını daha verimli kullanan bu sistemlerle telsiz iletişim sistemleri başarımında önemli bir sıçrama gerçekleştirilmiş ve UTRAN, 802.11 gibi protokol standartlarıyla telsiz iletişim sistemleri telli iletişim sistemlerine alternatif sunabilir konuma gelmiştir. 2006 sonrasında ise önce akıllı telefonların, sonrasında tablet ve ultrabook gibi aygıtların yaygınlaşmasıyla geniş bant iletişim ihtiyacı duyan gezgin birim sayısında önemli bir artış olmuştur. Bu durum araştırmacıların telsiz iletişim sistemlerine olan ilgisini arttırmış ve daha yoğun akademik eğilimlerle telsiz iletişim tekniklerinin başarımındaki yükseliş ivmelenmiştir. Günümüzde E-UTRAN (LTE-A) ve 802.11ac gibi standartlarla gigabit mertebesinde veri bloklarını bir saniye içerisinde aktarmak mümkün hale gelmiştir.

Yukarıda belirttiğimiz ve on seneden az bir sürede gerçekleştirilen ilerlemede çok girişli – çok çıkışlı (MIMO) sistemlerin payı büyüktür. Literatürde bulunan çeşitli çalışmalarda doğru koşullarda tasarlanan MIMO yapıları uzay – zaman kod tasarımlarıyla kullanılarak sistem başarımında çok önemli kazanımlar sağlandığı görülmüştür. Öte yandan işlem gücü artarken, boyutların genellikle küçüldüğü gezgin birimlerde istenen miktarlarda anten çoğullaması sağlamak çoğunlukla olanaksızdır. Bu noktada araştırmacılar iletişim sistemindeki farklı kullanıcıların birbirlerine ya da iletişim ağındaki adanmış röle birimlerinin işaretleşmeye yardım ettikleri sanal anten dizilerinin telsiz iletişim sistemlerinde kullanımını önermişlerdir. Sistem içerisindeki farklı birimlerin işbirliğine dayanan bu yapılar MIMO ağlarıyla aynı derecede başarımlı sağlayabiliyor olmaları nedeniyle ilgi odağı konumundadır.

Telsiz iletişim sistemlerine ilişkin diğer önemli bir nokta zaman, frekans, kod gibi kaynakların sistemdeki kullanıcılar için ortak olması ve artan uç birim sayısı ile birlikte hızı koruyabilmek için bu kaynakları arttırmak gerektiğidir ki çoğu zaman bu olanaksızdır. Bu durum telsiz iletişim sistemlerinin sığası için sınırlayıcı bir etkidir. Fakat işbirlikli iletişim sistemlerinin önerilmesine paralel olarak ortaya atılan ağ kodlamalı sistemler aynı kaynakların farklı kullanıcılar tarafından eş – zamanlı kullanımına olanak sağlamıştır. İlk olarak ağ kodlaması (SNC), sonrasında ise fiziksel katman ağ kodlaması (PNC) sistem kaynaklarının daha verimli kullanarak daha yüksek sistem sığalarına, iletim hızlarına olanak sağlamıştır.

Bu tez çalışmasında, işbirlikli iletişim sistemleri ağ kodlamalı iletişim yapıları altında incelenerek bit iletim ve enerji verimliliği ekseninde analiz edilmiştir. Röle ve hedefin paylaşıldığı iki kaynak birimli örnek bir iletişim sistemi için altı farklı

protokol önerilmiş olup bu yapılar birbirleriyle ve literatürdeki iki yönlü sistemlerle aynı koşullar altında karşılaştırılmıştır. Protokoller güvenilirlik ve hız odaklı iki farklı tasarım ölçütüyle oluşturulmuştur. Hızlı olan protokollerde amaç hedefe en kısa sürede en fazla bilgi bitini iletmek iken güvenilir sistemlerde hedefin hem kaynaklar hem de röle tarafından mutlaka besleniyor olması amaçlanmıştır. Protokoller, kaynakların farklı zaman ve aynı zaman aralıklarında iletim yaptıkları durumlar için iki farklı gruba ayrılmıştır. Aynı zamanda iletim yaptıkları sistemler eş – zamanlı sistemler olarak adlandırılmış olup fiziksel katman ağ kodlamalı yapıdadırlar. Ayrık – zamanlı iletim yaptıkları durumda ise kaynakların iletimi klasik zaman çoğullamalı yapıdadır; buna karşın röle birimi ağ kodlamalı olarak iletim yapmaktadır. Bu nedenle ayrık – zamanlı sistemlerin klasik zaman çoğullamalı yapılarla ağ kodlamalı yapıların bir karması olduğu söylenebilir. Tüm tasarımlarda hata yayılımını engellemek için röle ve/veya hedef birimlerinde ARQ uygulanmıştır.

Önerilmiş olan bu altı protokolün bit iletim verimliliği ve enerji verimliliği kuramsal çıkarımlarla ve benzetim sonuçlarıyla incelenmiştir. Başarımın iletim hızının kanal sığasının üstünde ya da altında kalması durumuna göre hesaplandığı bit iletim verimliliği için herhangi iki düğüm arasındaki anlık işaret – gürültü oranına bağlı kanal sığasının, iletim hızının altında kalması durumunda bu iki düğüm arasındaki iletişimin servis dışı kalacağı söylenebilir. Bu bilgiden hareketle bit iletim verimliliğine, kanal sığalarının altında kalarak hedef birime iletilen ortalama bit sayısı denilebilir. Enerji verimliliği ise iletilen bu ortalama bit sayısı için harcanan enerji miktarıdır. Benzetim sonuçlarıyla desteklendiği üzere sistemlerin ayrı ayrı tasarımlarıyla ilişkili olmakla beraber genel olarak eş – zamanlı sistemlerin daha yüksek en büyük bit iletim hızlarına ulaşabildiği, ayrık – zamanlı sistemlerinse düşük işaret – gürültü oranı ya da yüksek iletim hızlarında başarımlarını daha uzun süre koruyabildikleri söylenebilir. ARQ’yu hedefte uygulamanın ise rölede uygulamaya göre bit iletim verimliliği anlamında daha etkin bir çözüm olduğu belirtilebilir. Enerji verimliliği anlamında kötü ortam koşullarına daha az duyarlı olan (düşük SNR, yüksek hız) ayrık – zamanlı sistemler genel olarak daha başarılıdır. Hedefte ARQ uygulayan sistemler ise rölede ARQ uygulayan sistemlere göre daha verimlidir. Serbest uzay yol kaybının dikkate alındığı durumlarda röle konumunun uygun seçimiyle rölenin ARQ uyguladığı sistemlerin başarımları daha fazla olmakta, hatta düşük işaret – gürültü oranlarında rölede ARQ’lu sistemler yukarıda varılan yargının aksine hedefte ARQ’lu sistemleri bit iletim verimliliği anlamında geçebilmektedir. Benzer bir yorum enerji verimliliği üzerine de yapılabilir.

# **GOODPUT AND ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS FOR WIRELESS RELAYED COMMUNICATION SYSTEMS WITH COMMON DESTINATION**

## **SUMMARY**

Recently, evolution of technology resulted in smaller hardware components to process much more faster. It is now widely possible to use more complex, but better wireless communication systems with these smaller hardware. As a result, proposed high-performance channel coding methods in 90s have been deployed practically in 2000s. These systems can grant greatly better transfer rates compared to their predecessors and protocol suites like UTRAN, 802.11 have become to serve as an alternative for wired communication systems in case of performance. After 2006, with the help of smartphones, tablets and ultrabook like devices end users requiring wireless communication access has increased rapidly. This has caused wireless communication systems to be more popular and resulted in more researchers to work on this area. Finally the performance improved much more faster that it is now possible to transfer gigabit within a second with recent wireless communication systems such as E-UTRAN (LTE) and 802.11ac.

Resources are very limited in wireless communication systems as transmission medium is shared between a great variety of communication systems. This can be concluded to be the main disadvantage of wireless communication systems over wired communication systems. So, utilization of resources as time, frequency and code is crucial in wireless systems. Scheduling of these parameters is a very popular research topic to utilize system performance maximum among users. There is also lots of works done on source and channel coding either to minimize the size of data to be transmitted or reduce error probability during transmission to make it possible transferring more bits with single signal transmission (using higher level of modulation). Source coding is very common in a variety of communication systems (either wireless or wired), greatly reducing the size of raw data either without loss or small amount of loss (which is not recognized generally) such as voice (flac, mp3), image (png, jpeg), video (mpeg). However, channel coding is totally different. It aims to add some extra bits to data bulk to be transmitted. For example; an eight bit data block is represented with ten bit block (8/10 block coding) adding two extra bits for forward error correction. In this example, throughput efficiency is lost by twenty percent; but this loss is greatly covered by forward error correction capability of such a code design making communication systems more immuned against fading, shadowing effects. So, usage of higher leveled modulation schemes becomes possible without increasing transmit power. There are lots of channel coding methods including block, trellis, turbo, ldpc codes; but these are not in the scope of this work. Only a simple precoding method is introduced in this thesis which will be covered in detail later on.

The progress mentioned in the first paragraph is closely related with the implementation of MIMO systems. It is shown that transmitting and receiving

signals via uncorrelated antenna sets greatly increases the performance of wireless communication systems under fading channels. A lot of work done so far has shown that relevant MIMO systems with special code designs (space – time codes) significantly increases capacity. On the other hand, mobile devices are not big enough to achieve these uncorrelated antenna sets at user side, and they generally become smaller as a market trend whereas their process capacity increases. So it is not always possible to achieve spatial diversity on mobile devices that we can only talk about SIMO, MISO systems in such scenarios. At this point, researchers proposed cooperative communication systems to overcome the physical necessity of multiple antennas in a terminal. Cooperative communication makes it possible users help each other to transmit their signals or dedicated relay systems achieve this functionality. Such a design results in users in the system having virtual antenna arrays that provide MIMO virtually. It is shown that cooperative communication systems are able to grant same kind of diversity gain in wireless communication systems with generic MIMO systems which make this topic very popular recently.

Another major point related with capacity of wireless communication systems is the requirement for increase of shared resources as time, frequency, code, etc. with the rise of end users in the system to keep the same service quality. Unfortunately this is not always possible for communication systems that it is a crucial point for the capacity upper bound of wireless communication systems. Besides, just after the cooperative systems, network coding algorithms are proposed to better utilize these shared system resources. Firstly, straight forward network coding which aims to combine different users' data on a common signal is proposed. In these systems, different users transmit their signals traditionally that time, frequency or code is shared between them in the first phase. Later on in the second phase, a dedicated relay combines their data in bit level and transmit combined data with special mapping tables. Finally, users decode the received signal transmitted by relay to obtain other user's data using their own data knowledge. Physical network coding is something similar superceding straight forward network coding that users can transmit simultaneously in the first phase. Straight forward and physical layer network coding methods get lots of attention by researchers and various novel work is proposed on those subjects. These systems are initially designed to address two way relay networks, but later on different protocol sets including common destined systems are proposed.

In this thesis, cooperative communication systems are surveyed with straightforward and physical layer network coding setups in case of goodput and energy efficiency. Six novel protocol schemes are proposed for a generic wireless communication system setup with a common relay and destination shared by two distinct terminals. Protocols are constituted based on two different design criteria focussing each one on reliability and high rate. Later on, they are compared not only between each other but also some other work done recently under fair conditions. High rate protocols aim to transmit maximum source bits using less time slots whereas reliable protocols aim to deliver source bits from two distinct paths; source – destination and relay – destination. Protocols are grouped with their source transmission schemes: protocol stacks with sources transmitting at the same time are named simultaneous transmission and protocol stacks with sources transmitting separately are named discrete – timed transmission. Simultaneous transmission rely on physical layer network coding and discrete – timed transmission rely on traditional time divided access. Besides in both systems relay acts in a network coded manner. So we can

define discrete – timed transmission as a hybrid of time divided and network coded systems. All proposed protocols are designed with ARQ adaptation to prevent propagation of errors.

The performance of our six protocols are investigated both by theoretical analysis and simulation results in terms of goodput and energy efficiency. These two performance measures are evaluated by outage probability. Outage probability is the probability of transmitting data higher than channel's instantaneous capacity. So goodput is the amount of average data transmitted to destination below channels' capacity, and energy efficiency is the amount of average energy consumed to transmit this data. Based on our results it is shown that simultaneous transmission schemes generally perform better in terms of goodput. On the other hand discrete – timed protocols act better under worse conditions as lower SNR, higher rate. It can also be said that destination oriented ARQ protocols acts better than relay oriented ARQ protocols. In case of energy efficiency generally discrete – timed protocols acts better as these are more prone under extreme conditions. Destination oriented ARQ protocols are more energy efficient than relay oriented ARQ protocols. Last but not least, it is seen that relay based ARQ schemes may outperform other protocols under the path loss effect. It is concluded that relay position optimization is an important design criteria for cooperative systems. Same comment can be generalized for energy efficiency as well.



## 1. GİRİŞ

İletişim sistemlerinde en temel amaç son kullanıcılara daha iyi hizmet sunmaktır. Kalitenin yükseltilebilmesi için ise öncelikli olarak hızlı hizmet sunulabilmesi, buna bağlı olarak da iletişim sistemlerinin sığasının arttırılması gerekmektedir [1]. Servis kesilme olasılıklarının ise uygulama katmanınca belirlenmiş olan eşiklerin altında kalması gerekir. Günümüzde, iletişim sistemi tasarımlarında optimum kesinti oranlarında maksimum iletim hızı sağlamak hedef edinilmektedir [2].

İletim ortamının adanmış bir hat olduğu telli iletişim sistemlerinde taşıyıcı frekans, bant genişliği, kanal sönümlemesi ve gürültü gibi sınırlayıcı etkenlerin baskınlığı düşüktür. Bu yüzden yüksek hızlara çıkmak telsiz iletişim sistemlerine göre daha kolaydır. Günümüzde, telli iletişim sistemleriyle servis sağlayıcı alt yapılarında terabit'ler seviyesine, son kullanıcı tarafında ise gigabit'ler seviyesine ulaşmak mümkündür. Bu bağlamda iletişim hızının kullanıcı deneyiminde dar boğaz teşkil ettiği sınırlar aşılmış ve bulut bilişim sistemlerin önü açılmıştır.

Telsiz iletişim sistemlerinde ise durum farklıdır. Başta kanalın bozuculuğu olmak üzere; iletim ortamının paylaşılan bir kaynak olması, gürültü ve sınırlı bant genişlikleri nedeniyle sistem karmaşıklığı artmakta ve yüksek veri hızlarına çıkmak çok daha güç hale gelmektedir [3]. Ayrıca; çok yollu yayılımın geçerli olduğu hücreli ve kişisel telsiz ağlarda, kanalın normal dağılıma yakınsadığı uydu tipi iletişim sistemlerinin aksine, çok yüksek taşıyıcı frekanslarında çalışmak günümüz koşullarında mümkün değildir.

Öte yandan telsiz iletişimin mümkün kıldığı mekandan bağımsızlık ve esneklik; akıllı telefon, tablet gibi aygıtların da yaygınlaşmasıyla telsiz iletişim sistemlerine olan ilgiyi son yıllarda önemli ölçüde arttırmıştır. Yapılan son araştırmalara göre, son kullanıcıların geniş bant ağ erişiminde telli sistemlerin pazar payı önemli ölçüde azalmıştır. Bu durumun oluşmasında, telli iletişim sistemlerinin önemini yitirmesinden çok; dizüstü bilgisayar, tablet, akıllı telefon gibi taşınabilir aygıtların gündelik hayatımızda önemli ölçüde rol almaya başlamasına bağlı olarak telsiz

iletişim sistemlerinin dikkat çekmiş olması etkindir. Akıllı ev ve araçlar, giyilebilir teknolojiler gibi yeni yapıların da gelişmesiyle 2020 yılında elli milyar aygıtın geniş bant internet erişimine sahip olacağı öngörülmektedir [4]. Bu durum telsiz iletişim sistemlerine olan ilginin artarak süreceğinin göstergesidir.

Buna karşın yukarıda bahsettiğimiz kısıtlar telsiz iletişim sistemlerinin gelişmesindeki en önemli engeldir. Yapılan araştırmaların neticesinde anten çoğullaması, çeşitli kodlama, erişim ve modülasyon teknikleri kullanarak belirli veri hızlarına çıkılabileceğı gösterilmiş [5-8] ve 3G (CDMA, HSPA), 4G (LTE, LTE-A) gibi yapılarla standartlaştırılmıştır. En güncel standart olan LTE-A ile laboratuvar ortamında 1 Gbps düzeyinde hızlara çıkılmış olmakla birlikte [9] güç, verimlilik ve hız açısından başarımlı daha yüksek sistemlerin geliştirilmesi gelecek açısından önemlidir.

### **1.1 Tezin Amacı**

Bu tez çalışmasının amacı işbirlikli iletişim sistemleri ve işbirlikli iletişim sistemlerinin başarımlı ölçütlerinden olan bit iletim hızı ve enerji verimliliğı [10-14] üzerine çıkarımlarda bulunmaktır. Ayrıca bu çıkarımlar neticesinde ortak hedefli röleli iletişim sistemleri için başarımlı yüksek protokol yaklaşımlarında bulunmak hedeflenmiştir.

### **1.2 Literatür Araştırması**

Çok girişli – çok çıkışlı yapıların (uzay – çeşitlemesi) telsiz iletişim sistemlerinin başarımlı katkısı literatürdeki çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir [5-6]. Buna karşın, iletişim sistemlerinde kullanılan frekans bantlarında (ihtiyaç duyulan bant genişliğı nedeniyle yüksek frekanstaki taşıyıcılar) ufak boyutlardaki gezgin birimlerde istatistiksel bağımsız kanal yapılarını sağlayabilecek anten çoğullamasının gerçekleştirilmesi güçtür. Dolayısıyla sanal olarak çok girişli – çok çıkışlı sistem yapıları sağlayan işbirlikli iletişim sistemleri (uzay – çoğullaması) literatürdeki çeşitli çalışmalarda önerilmiştir [8, 15-18].

İşbirlikli iletişim sistemleriyle kaynak ile hedef arasındaki işaretleşmeye yardımcı olan röle adlı adanmış düğümler ortaya çıkmıştır. Literatürde incelenen röleli iletişim yapılarında hedef ve kaynak birimleri yalnızca röle üzerinden [19] veya doğrudan

birbirleriyle ve röle üzerinden [20] iletişim sağlamaktadırlar. Röle biriminin iletişim sistemlerinde kullanımına yönelik araştırmaların artması Shannon tarafından 1961’de incelenen iki yönlü röleli sistemlerin [21] dikkat çekmesine neden olmuştur. Dolayısıyla röle yardımıyla noktadan noktaya iletişim sağlanması ve ağ katmanı, fiziksel katman ağ katmanı kodlamalı sistem tasarımları önerilmiştir. Bu tez kapsamında ağ katmanı kodlamalı ve fiziksel katman ağ kodlamalı sistemlerden işbirlikli iletişim protokol tasarımlarında yararlanılmıştır.

İşbirlikli sistemlerin başarımlar ölçütlerinde iki ana yaklaşımdan bahsedilebilir: Bunlardan ilki iletilen işaretin hedef birim tarafından hatalı sezilmiş olma olasılığı [20], ikincisi ise iletim yapılan hızın anlık olarak kanal sığasının üzerine çıkmış olma olasılığıdır [10]. Bu iki temel yaklaşım altında enerji tüketimi, sistem karmaşıklığı gibi diğer temel ölçütler değerlendirilebilir. Bu tez çalışması kapsamında iki yaklaşıma yönelik de sonuçlar sunulmuş olup tezin literatüre katkısı ikinci yaklaşım üzerinden yapılmıştır.

[10] ve [11]’de ağ kodlamalı ve fiziksel katman ağ kodlamalı iki yönlü röleli iletişim sistemleri bit iletim hızı, normalize bit iletim hızı ve enerji verimliliği ekseninde incelenmiştir. Önerilmiş olan iletişim sistemlerinin davranışları Markov zincirleriyle tanımlanmış olup EK A’da ayrıntılarıyla verilen otomatik yineleme isteme (ARQ) protokolüyle desteklenmiştir.

### **1.3 Tezin Literatüre Katkısı**

Bu tez çalışması kapsamında öncelikli olarak işbirlikli iletişim sistemleri bazı temel özelliklerine göre gruplandırılarak incelenmiştir. Daha sonra [20]’de verilen karmaşık düzlem ağ kodlamalı sistem incelenmiş ve başarımlar ölçütleri sunulmuştur. 4. Bölüm ile birlikte kanal sığasının sistem başarımlar üzerindeki etkisi (ikinci yaklaşım) araştırılmış olup farklı varsayımlar altında analiz edilmiş olan [10] ve [11]’deki sistemler ortak bir paydada karşılaştırılmıştır.

5. Bölüm’de, literatürde iki yönlü röleli ya da temel yapıdaki işbirlikli (tek kaynak, tek röle ve tek hedef barındıran) sistemler için irdelenen kanal sığası üzerinden sistem başarımlar yaklaşımı ortak hedefli röleli sistemlere uygulanmıştır. Bu tezde iletişim sistemindeki çeşitli düğümlerde ARQ kullanmak kaydıyla rölede çöz ve aktar iletim tekniğini kullanan altı farklı yeni protokol önerilmiştir. Bu protokoller iki

kullanıcının aynı röle ve kaynağı paylaştığı yapı için güvenilirlik veya yüksek hız temel odaklarıyla (Protokol – 1, 3, 5 güvenilirlik; Protokol – 2, 4, 6 hız) tasarlanmıştır. Bu protokoller, tez içerisinde verilen tasarım ve başarımlar ölçütleri göz önüne alınarak  $N$  kullanıcı ve  $M$  röleli sistemlere uyarlanabilir.

Önerilmiş olan protokoller bit iletim hızı, normalize bit iletim hızı ve enerji verimliliği ekseninde birbirleriyle ve [10-11]'deki sistemlerle karşılaştırılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Sonuçlar eş dağılımlı kanallar (eş sönümlemeli ve serbest uzay yol kaybının olmadığı) ve serbest uzay yol kaybı yaklaşımı altında yorumlanmış olup yapısal olarak birbirinden farklı olan iki yönlü röleli ve ortak hedefli röleli sistemler adil olarak sınanmaya çalışılmıştır.

Bölüm 5'te analizlerine yer verilen altı farklı protokolün başarımında, iki yönlü röleli sistemlerden farklı olarak, rol oynayan bir başka önemli veri röle konumunun seçimidir. İki yönlü röleli sistemler için en basit anlamda, rölenin her iki uç birime eş uzaklıkta olmasının sistem başarımını en yüksek düzeyde tutacağı öngörülebilir. Öte yandan ortak hedefli röleli sistemlerde kaynaklar ile hedef arasında doğrudan ve röle üzerinden iki farklı iletim hattı bulunduğu ve kaynaklar ile röle farklı şekillerde iletim yaptıkları için röle konumunun doğru seçimi iletişim sisteminin başarımı açısından önemlidir. Bu yüzden, en iyi röle konumunun belirlenmesi problemi Bölüm 5 içerisinde ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

## 2. İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM SİSTEMLERİ

Bu bölümde işbirlikli iletişim sistemleri hakkında genel bilgi verilecektir. İşbirlikli iletişim sistemlerini ve genel başarımlar ölçütlerini iyi analiz edebilmek için kanal modelleri ve sönümlemeli kanallar, çok girişli – çok çıkışlı sistemler, uzay – zaman kodları, çeşitleme, alıcı birleştirme teknikleri (en büyük olabilirlikli çözüm – ML Decoder, en büyük oran birleştirici – MRC) gibi temel konulara hakimiyet gerekmektedir. Bu bilgiler [1- 2, 6-7, 22-25]’te ayrıntılı şekilde verilmiştir.

Matematiksel çıkarımlarda sönümlemeli kanalların düz (frekans seçici olmayan) olduğu (iletilen işaretin bant genişliği kanalın uyum bant genişliğinden küçük) varsayımı göz önüne alınarak kanal sönümleme katsayıları çarpımsal olarak verilmiştir. Bu bölümde röle çeşitlerine, sistem yapılarına, röle iletim tekniklerine ve iletim ortamı kullanımına göre işbirlikli iletişim sistemleri irdelenmiştir.

### 2.1 Röle Çeşitlerine Göre Sistem Yapıları

Kaynak işaretlerinin hedefe farklı yollardan gönderilerek başarımın artırılması esasına dayanan işbirlikli iletişim sistemleri ilk kez ortaya atıldığında, aktif ve pasif röleli yapılar olmak üzere iki farklı yaklaşımla çalışmalar yapılmıştır [8, 26]. Bunlardan aktif röleli olan yapılar kaynaklarını etkin bir şekilde kullanmakta olan uç birimlerin birbirine yardım etmesi esasına dayanırken pasif röleli yapılar ise atıl durumdaki uç birimlerin yahut adanmış rölelerin aktif durumdaki kullanıcılara yardım etmesi esasını temel alır.

#### 2.1.1 Aktif röleli sistemler

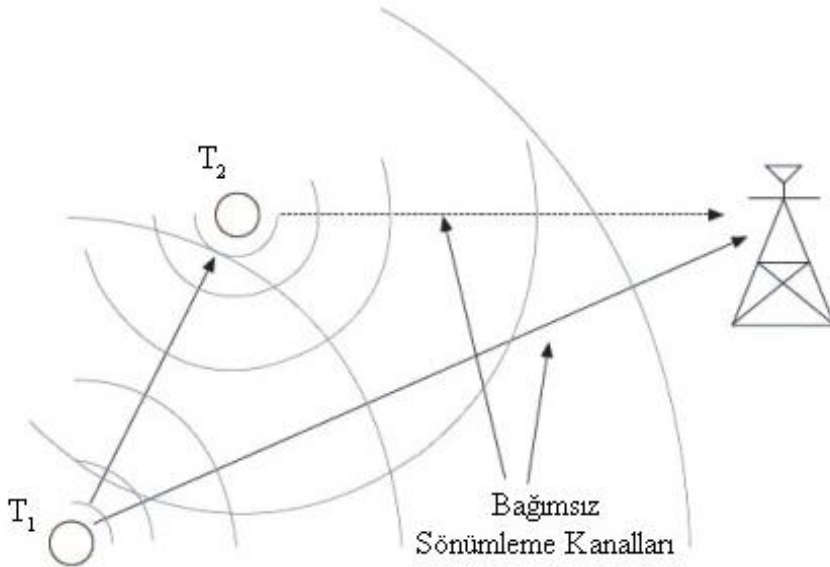
Aktif röleli sistemler bilgi aktarımı halindeki kullanıcıların kaynaklarını paylaştıkları yapılardır [8]. Örneğin; veri iletimi yapmakta olan  $T_1$  ve  $T_2$  terminallerinin işbirlikli iletişim yapısını ele alalım.  $T_1$ , hedef birimi olan baz istasyonu (D) ile doğrudan ve  $T_2$  üzerinden,  $T_2$  ise yine aynı hedef birimi baz istasyonu (D) doğrudan ve  $T_1$  üzerinden konuşur.  $T_1$  için  $T_1$ - $T_2$ -D,  $T_2$  için ise  $T_2$ - $T_1$ -D kaskat kanalları aynı bilgi

işaretinin ekstra kopyalarını hedef birime taşımaktadır. Bu çeşitleme, uygun kodlama tekniklerinin kullanıldığı durumda başarıma önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

Öte yandan, verimliliğinin düşük olması (klasik zaman çoğullamalı sistemlerde her bilgi işaretinin her farklı düğümden iletilmesi için yeni zaman aralığına ihtiyaç duyulması nedeniyle tek yönlü iletimde mutlak olarak dört iletim periyoduna ihtiyaç duyulması), batarya başarımının çoğu zaman darboğaza neden olduğu uç birimlerde duyulan fazladan güç ihtiyacı, olası güvenlik problemleri gibi nedenler dolayısıyla aktif röleli sistemler çok fazla ilgi çekmemiştir.

### 2.1.2 Pasif röleli sistemler

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere pasif röleli yapılar için sistemde bulunan ikinci düğüm, aktif olan kullanıcının bilgi dizisini hedef birime iletmesine yardımcı olmaktadır [26]. İlk zaman aralığında  $T_1$  kullanıcısı iletimde bulunurken, ikinci bir zaman aralığında ise  $T_2$  kullanıcısı ilk zaman aralığında  $T_1$ ’den aldığı işaretleri hedefe iletmektedir. Böylece sanal bir çok çıkışlı sistem yapısı elde edilmekte, verici çeşitlemesinden söz edilebilmektedir.  $T_2$  kullanıcısının iletim başarımına katkısında  $T_1$ ’le ve hedefle arasındaki kanalların yapısı temel etkindir. Bu yüzden pasif röleli sistemlerde röle seçimi kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 2.1 : İşbirlikli iletişim sistemlerinde pasif röleler.

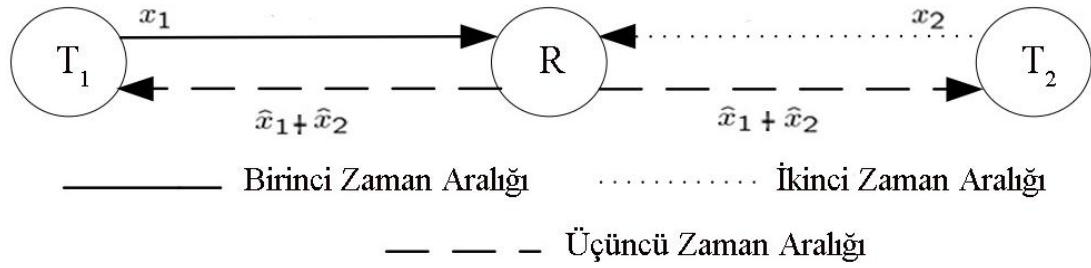
Aktif röleli sistemler için Bölüm 2.1.1’de belirtilen problemler rölenin sistem içerisindeki kullanıcılar arasından seçildiği durumda pasif röleli sistemler için de geçerlidir. Bu yüzden, söz konusu sorunları bertaraf eden servis sağlayıcı tarafından

yönetilen adanmış röle sistemleri tasarlanmıştır. Literatürdeki çoğu çalışma bu yöndeki rölelerle yapılmış olup bu tez çalışması kapsamındaki tüm röle düğümleri adanmış pasif rölelerdir.

## 2.2 Sistem Yapılarına Göre İşbirlikli İletişim Teknikleri

### 2.2.1 İki yönlü röleli sistemler

İki yönlü röleli sistemlerde röle uç birimler arasındaki karşılıklı iletişimi sağlamaktadır [26-27]. Bu yapılarla tasarlanan sistemlerde uç birimler arasında doğrudan bir iletişim kanalı olabileceği gibi Şekil 2.2’de verildiği üzere bilgi aktarımı yalnızca röle üzerinden de sağlanabilir. Fakat sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak verilecek olan fiziksel katman ağ kodlamalı sistemlerde uç birimler arasında doğrudan bir kanal olsa bile yarı zamanlı iletişim durumunda bu kanal kullanılamaz (aynı zamanda hem yukarı yönlü hem de aşağı yönlü iletim yapılamayacağı için).



Şekil 2.2 : İki yönlü röleli sistemler.

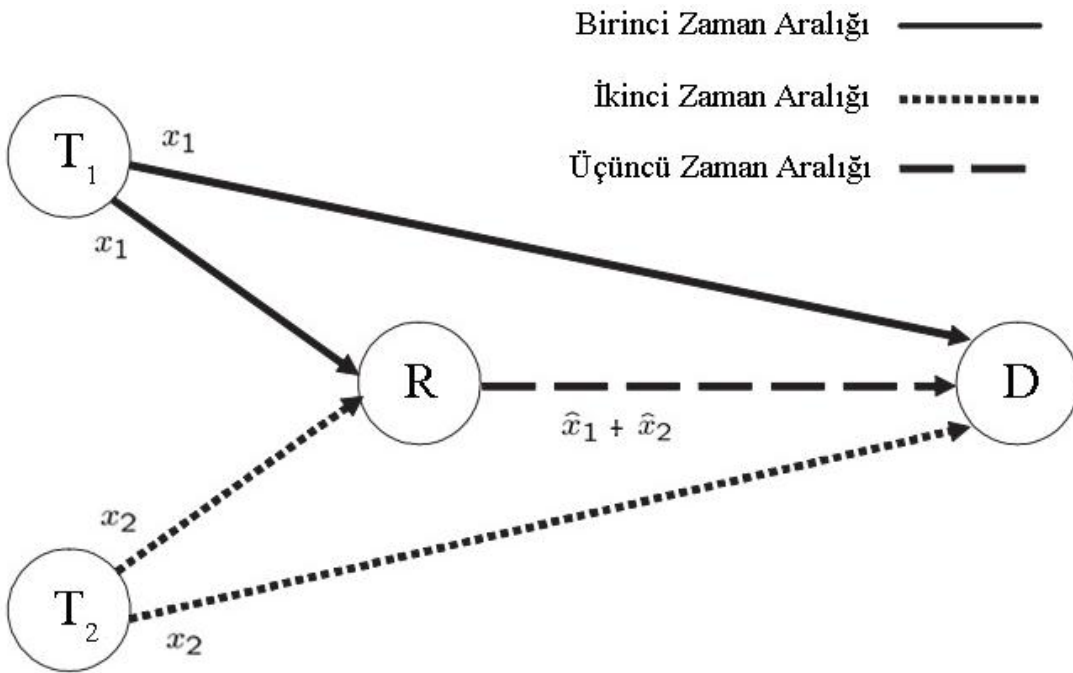
Şekil 2.2’de belirtilen en temel iki yönlü iletişim sistemi için birinci zaman aralığında T<sub>1</sub>, ikinci zaman aralığında T<sub>2</sub> kendi bilgi işaretlerini röleye aktarır. Üçüncü zaman aralığında ise röle kestirimde bulunduğu T<sub>1</sub> ve T<sub>2</sub> bilgi işaretlerini fiziksel ya da ağ katmanında toplamsal birleştirerek uç birimlere iletir. Sonrasında ise her iki uç birim röleden aldığı işaretten kendi işaretini çıkararak diğer uç birimin bilgi işaretini kestirmiş olur.

İki yönlü röleli sistemler noktadan noktaya erişim (peer to peer) ya da yukarı ve aşağı veri iletim isteklerinin simetrik olduğu durumları modellemek için idealdir. Öte yandan E-UTRAN, Wi-Fi gibi sistemlerde genellikle tek bir ortak hedefe birçok uç birim istekte bulunmaktadır. Ayrıca aşağı yönlü iletim hızı ihtiyacı yukarı yönlü iletim hızı ihtiyacından çok daha fazladır. Bu nedenle bu mimarilere uygun daha genel bir sistem yapısının modellenmesi gerekmektedir.

### 2.2.2 Genelleştirilmiş sistem

Telsiz iletişim sistemlerinde uç birim ile hedef arasındaki kanalın bozucu etkilerinin yüksek olduğu durumlarda iki düğüm arasına röle yerleştirmek sistem başarımını önemli ölçüde iyileştirmektedir. İletim ortamına aynı anda çoklu erişimin sağlandığı telsiz iletişim sistemlerinde uç birimlerin ortak fayda sağlayabilecekleri rölenin kullanımı Şekil 2.3'te iki kullanıcılu durum için verilmiştir. Sistemde uç birimler ile hedef arasında görüldüğü üzere doğrudan bağlantı olabileceği gibi kullanılabilir bir kanal olmayıp tüm iletişim röle üzerinden sağlanıyor olabilir [20].

Şekil 2.3'teki yapı için birinci zaman aralığında  $T_1$ , ikinci zaman aralığında  $T_2$  bilgi dizilerini röle ve hedefe iletirken üçüncü zaman aralığında röle kestirimde bulunduğu  $T_1$  ve  $T_2$  bilgi işaretlerini fiziksel ya da ağ katmanında toplamsal birleştirilerek hedefe iletir.



Şekil 2.3 : İşbirlikli iletişim genelleştirilmiş sistem yapısı.

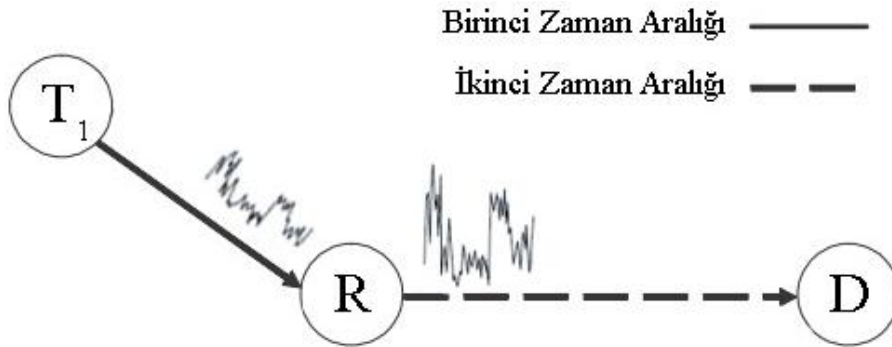
Bu yapı hedef birimin olmadığı durumda Şekil 2.2'deki sisteme yakınsanabileceği gibi telsiz iletişim sistemlerindeki genel yapıyı örneklemesi açısından önemlidir. Sistemdeki kullanıcı sayısının  $N$  olduğu durumda  $N+1$  zaman aralığı kullanımıyla bir periyotluk bilgi aktarımı gerçekleştirilir.

## 2.3 İşbirlikli İletişim Sistemlerinde Röle Aktarım Teknikleri

İşbirlikli sistemler rölenin davranışına göre sınıflandırılabilir. Bu davranışlar temel olarak rölenin aldığı işaretleri kuvvetlendirip iletmesi veya çözüp iletmesine dayanırken çözdüğü durumda çeşitli protokollerden bahsetmek mümkündür. Literatürde sıklıkla görülen röle aktarım teknikleri bu bölümde basit şekliyle anlatılacak olup bu yöntemlerin çeşitli sistemlerde başarımı sonraki bölümlerde incelenecektir.

### 2.3.1 Kuvvetlendir ve aktar

Şekil 2.4'te örnek yapısı verilen kuvvetlendir ve aktar tekniği rölenin aldığı sürekli işaretleri çözmeden doğrudan kuvvetlendirerek hedef birime ilettiği durumdur. Sürekli işaretlerin belleklenmesinin zor ve maliyetli olması nedeniyle farklı zaman birimlerinde alınan işaretlerin algoritmik birleştirilmesi gibi işlemler kuvvetlendir ve aktar yöntemi için pratikte uygulanabilir değildir.



Şekil 2.4 : Kuvvetlendir ve aktar yöntemi.

Şekil 2.4'te verilen kuvvetlendir ve aktar yöntemi göz önüne alınırsa; kaynak  $T_1$  ile hedef  $D$  arasındaki işaretleşmeden bağımsız olarak birinci zaman aralığı sonucunda röle alıcı anten girişine gelen  $y_R$  işareti

$$y_R = h_{1R} \sqrt{P_1} x_1 + n_{1R} \quad (2.1)$$

olarak verilebilir. Burada  $h_{1R}$   $T_1$  kaynağı ile  $R$  röle arasındaki kanalı,  $n_{1R}$  röle girişindeki toplamsal gürültüyü,  $P_1$  kaynak iletim gücünü ve  $x_1$  ise kaynak bilgi işaretini göstermektedir. Röle aldığı  $y_R$  işaretini ikinci zaman aralığında analog olarak kuvvetlendirerek hedefe iletir. Kuvvetlendirilen bu işaret röle çıkışında

$$y'_R = \sqrt{\beta P_R} y_R \quad (2.2)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada  $P_R$  rölenin iletim gücünü,  $\beta = 1/|y_R|^2$  ise alınan  $y_R$  işaretinin gücünü belirtmektedir. Kaynak işareti  $x_1$ 'in birim güçlü,  $h_{1R} \sim CN(0,1)$ ,  $n_{1R} \sim CN(0, N_0)$  olduğu durumda röle çıkışındaki  $y'_R$  işareti

$$y'_R = \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_1 + N_0}} y_R \quad (2.3)$$

olur. İkinci zaman aralığı sonunda hedef alıcı devresi girişindeki işaret de

$$y_D = h_{RD} \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_1 + N_0}} y_R + n_{RD} \quad (2.4)$$

olarak verilir. Kuvvetlendir ve aktar yöntemi, düşük karmaşıklığı, rölede çözme gerektirmemesi nedeniyle özellikle fiziksel katman ağ kodlamalı sistemlerde sağladığı düşük gecikme ve göreceli az işaret – gürültü oranlarındaki yüksek başarımlı dolayısıyla sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir.

### 2.3.2 Çöz ve aktar

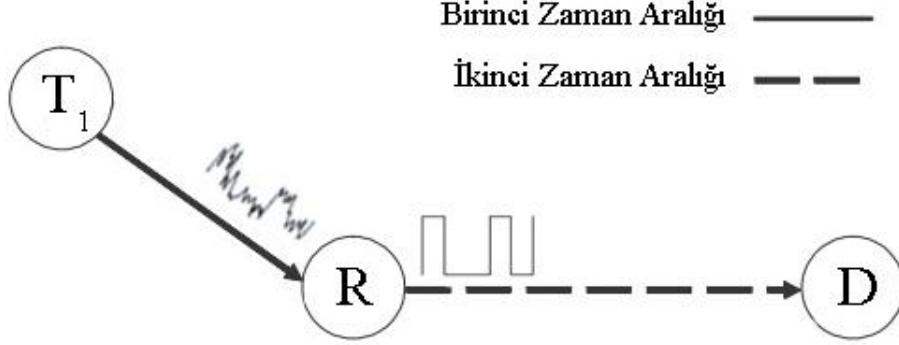
Çöz ve aktar tekniğinde, kuvvetlendir ve aktar tekniğinin aksine röle aldığı işaret dizilerini çözer ve çözdüğü bu işaretleri hedef birime iletir. Çözülen sayısal işaretlerin düşük maliyetle belleklenebilmesi bu yöntem üzerine çeşitli uyarlamaları mümkün kılmaktadır. Bölüm 2.3.3 ve 2.3.4'te anlatılacak olan seçici çöz ve aktar ve akıllı sez ve aktar bu uyarlamalara örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca, röle farklı kaynak birimlerinden farklı zaman aralıklarında aldığı işaretleri çeşitli şekillerde birleştirerek hedef birime iletebilir.

Şekil 2.5'te verilen çöz ve aktar yöntemi göz önüne alınırsa; kaynak  $T_1$  ile hedef  $D$  arasındaki işaretleşmeden bağımsız olarak birinci zaman aralığı sonucunda röle alıcı anten girişindeki işaret (2.1)'deki gibi verilebilir.

Alınan  $y_R$  işareti en büyük olabilirlikli alıcı yardımıyla çözülürse röledeki  $x_1$  simge kestirimi

$$\hat{x}_1^R = \text{Arg min}_{x_a \in A} \{ |y_R - h_{1R} \sqrt{P_1} x_a|^2 \} \quad (2.5)$$

yazılır. Burada  $x_a$ ,  $A$  işaret uzayından seçilen her bir simgedir.



Şekil 2.5 : Çöz ve aktar yöntemi.

Benzer şekilde ikinci zaman aralığı sonunda hedef alıcı devresi girişindeki işaret

$$y_D = h_{RD} \sqrt{P_R} \hat{x}_1 + n_{RD} \quad (2.6)$$

olup  $h_{RD}$  röle ile hedef arasındaki kanalı,  $n_{RD}$  ise hedef alıcı girişindeki toplamsal gürültüyü ifade etmektedir. Çöz ve aktar yöntemi kaynak – röle arası iletişim için düşük işaret – gürültü oranlarında kötü başarımla karşılaşılmasına karşın işaret – gürültü oranı yükseldikçe başarımla iyileşmektedir. Öte yandan, çözülen işaretlerin kolaylıkla belleklenebilmesi röle üzerinde çeşitli algoritmaların geliştirilebilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yüzden de başarımla yönündeki zayıflığına rağmen çöz ve aktar tekniği sıklıkla tercih edilebilmektedir.

### 2.3.3 Seçici çöz ve aktar

Seçici çöz ve aktar tekniği, çöz ve aktar tekniğiyle benzer, (2.5)'te gösterildiği üzere, şekilde kaynak birimden aldığı bilgi dizisini çözerek hedef birime iletir. Çöz ve aktar sistemiyle arasındaki fark ise röle biriminin herhangi bir aktarım yapmadan önce bir çerçevelik bilgi akışı boyunca kaynağı dinlemesidir. Kaynak birimin bir çerçevelik aktarımı tamamlamasının sonrasında artıklık bitleri yardımıyla çerçeve boyunca herhangi bir işaretin hatalı sezilip sezilmediğine karar verir. Hata tespiti halinde röle ya kaynaktan aynı çerçeveyi tekrar iletmesini ister (ARQ – otomatik yineleme isteme) ya da (kaynak ile hedef arasında doğrudan iletişim olması durumunda) aldığı çerçeveyi çöpe atarak kaynak ve hedef birimleri bilgilendirir. Bu yolla hata yayılımı

engellenir ve kaynak yeni/yeniden çerçeve iletimine başlaması hususunda tetiklenmiş olur.  $N_f$  uzunluklu bit dizisi (bir çerçevelik iletim) için  $x_e$  rölede sezilen hatalı bit sayısını göstermek üzere bir çerçevelik iletim sonunda hedef alıcıda hatalı sezilen simge sayısı  $C[x_e, N_f]$  için

- i.  $C[x_e, N_f] = 0$  için rölenin yapacağı bir çerçevelik iletim sonunda hedef alıcı anten girişinde

$$y_D = H_{RD} P_R x_1 + n_{RD} \quad (2.7)$$

elde edilir. Burada alıcı girişindeki işaret  $y_D$   $N_f \times 1$  uzunluklu olup,  $H_{RD}$  kanal matrisi  $N_f \times N_f$ ,  $P_R$   $N_f \times N_f$  uzunluklu ve  $P_R$  gücüyle normalize edilmiş birim matris ( $[P_R, 0, 0, \dots, 0; 0, P_R, 0, \dots, 0; \dots; 0, 0, 0, \dots, P_R]$ ),  $x_1$  bilgi dizisi ve  $n_{RD}$  gürültü bileşeni  $N_f \times 1$  uzunlukludur.  $T$  bir simgenin iletim periyodu ve  $t$  anında ilk simgenin iletimi tamamlanmış olmak üzere, bir çerçevelik bilgi dizisi için işaretleşme süresi ise  $t + (N_f - 1) T$  olarak verilebilir.

- ii.  $C[x_e, N_f] \neq 0$  için röle herhangi bir iletimde bulunmaz ve bu yolla hata yayılımını engeller. Kaynak birim çerçeve iletimini tekrarlar veya yeni işaret dizisinin aktarımına başlar.

Seçici çöz ve aktar yöntemi, çöz ve aktar yönteminde karşılaşılan hata yayılımı problemini çözmekte ve seleftinin sağlamakta noksanlık gösterdiği en büyük çeşitlemeyi yeterince büyük işaret – gürültü oranları için sağlayabilmektedir. Buna karşın kaynak – röle arası işaret gürültü oranının düşük değerleri için rölenin bir çerçevelik bilgi dizisini hatasız çözme olasılığı  $p_c$ , herbir işaretin rölede hatalı çözülme olasılığı  $p_e$  olmak üzere

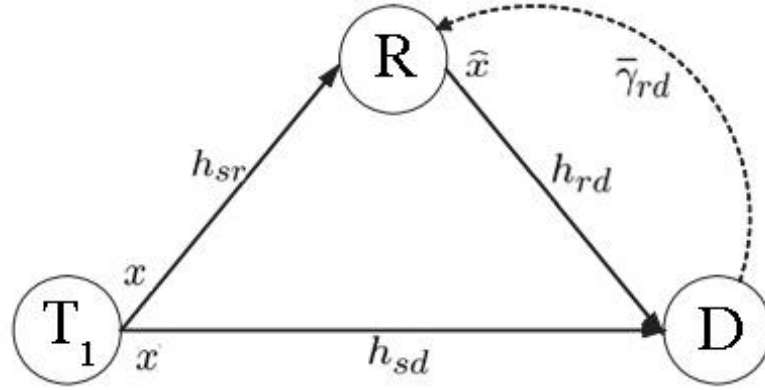
$$p_c = (1 - p_e)^{N_f} \quad (2.8)$$

yazılır. Çerçeve uzunluğunun artmasının da bu başarıma olumsuz etkisi (2.8)'den kolaylıkla görülebilir. Öte yandan çerçeve uzunluğu arttıkça iletilen verideki artık bit miktarının taşınan bilgiye oranı azalacak ve iletim verimliliği artacaktır. Bu nedenle iletişim sistemi tasarlanırken çerçeve uzunluklarının seçimi başarımlar açısından önem arz etmektedir.

### 2.3.4 Akıllı çöz ve aktar

Temel olarak akıllı çöz ve aktar yöntemi, çöz ve aktar yöntemiyle kuvvetlendirir ve aktar yönteminin karma bir yapısı olarak değerlendirilebilir. Giannakis [28] tarafından önerilmiş olan bu yöntemde röle, kaynaktan aldığı bilgi işaretini çözer; kaynak – röle, röle – hedef arasındaki link kalitelerine bağlı olarak iletim gücünü  $P_R$  ile üstten sınırlar. Böylece,  $P_T$  gücü ile iletim yapmakta olan kaynağın hedef alıcı girişinde oluşturduğu işaretin baskınlığını düzenler.

Şekil 2.6’da verilen işbirlikli iletişim yapısında hedef röle ve kaynak üzerinden aynı bilgi dizisinin farklı kopyalarını almaktadır. Röle düğümü akıllı sez ve aktar yöntemiyle kaynak bilgi dizisini hedefe aktarmakta ve çeşitleme katkısında bulunmaktadır.



Şekil 2.6 : Akıllı çöz ve aktar yöntemi.

Şekil 2.6’da verilen sistem için birinci zaman aralığı sonunda röle alıcı girişine gelen işaret

$$y_R = h_{SR} \sqrt{P_1} x_1 + n_{1R} \quad (2.9)$$

şeklinde verilir. (2.9)’dan hareketle kaynak – röle arası anlık işaret – gürültü oranı

$$\gamma_{1R} = |h_{1R}|^2 \bar{\gamma}_{1R} \quad (2.10)$$

olur. Benzer şekilde ikinci zaman aralığı sonunda röle – hedef arasındaki anlık işaret – gürültü oranı

$$\gamma_{RD} = |h_{RD}|^2 \bar{\gamma}_{RD} \quad (2.11)$$

olarak verilir. Burada

$$\bar{\gamma}_{1R} = \sigma_{1R}^2 \bar{\gamma}, \quad (2.12)$$

$$\bar{\gamma}_{RD} = \sigma_{RD}^2 \bar{\gamma} \quad (2.13)$$

olarak verilmektedir.  $\bar{\gamma}$  sistemin ortalama işaret – gürültü oranı olup

$$\bar{\gamma} = P / N_0 \quad (2.14)$$

şeklinde tanımlanabilir. Kaynak – röle arası iletişim için  $P$  iletim gücü  $P_1$ , röle – hedef arası iletişim için  $P_R$  olarak verilir. İletişim sistemlerinde yukarı yönlü iletişim için kaynak – röle arasındaki anlık işaret – gürültü oranı her bilgi işareti iletimiyle ileri beslenirken, röle – hedef arası işaretleşmede her bilgi iletimi sonucunda hedefin anlık – işaret gürültü oranını röleye geri beslemesinin, bağımsız zaman kaynağı kullanımı ihtiyacı nedeniyle sistem başarımı üzerindeki olumsuz etkisi olur. Sonuç olarak; her aktarımda geri besleme yapılması yerine belirli aralıklarla bu bilginin beslenmesi yaklaşımında bulunulabilir (her çerçevelik iletim için beslenmesi yahut durağan kanallar için daha uzun periyotlarla geri beslenmesi). Sistem ve kanal yapısı bu seçimin yapılmasında temel etkindir.

Bu bilgiler ışığında  $\alpha$  kuvvetlendirme katsayısı anlık ve ortalama işaret – gürültü oranları için aşağıdaki gibi verilir:

$$\alpha_{anlık} := \frac{\min(\gamma_{1R}, \gamma_{RD})}{\gamma_{RD}} P_R, \quad (2.15)$$

$$\alpha_{ort} := \frac{\min(\gamma_{1R}, \bar{\gamma}_{RD})}{\bar{\gamma}_{RD}} P_R. \quad (2.16)$$

(2.15) ve (2.16)'dan görülebileceği üzere  $\alpha$  kuvvetlendirme katsayısı her iki kullanım için de  $P_R$  ile üstten sınırlandırılmıştır. Tüm bu bilgiler ışığında röle birinci zaman aralığında aldığı (2.9)'da gösterilen işareti

$$\hat{x}_1^R = \text{Arg min}_{x_a \in A} \{ |y_{1R} - h_{1R} \sqrt{P_1} x_a|^2 \} \quad (2.17)$$

şeklinde çözerek ikinci zaman aralığında hedefe

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{\alpha_{anlık}} \hat{x}_1 + n_{RD} \quad (2.18)$$

veya

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{\alpha_{ort}} \hat{x}_1 + n_{RD} \quad (2.19)$$

şeklinde aktarır. Yukarıda belirttiğimiz gibi anlık ya da ortalama kuvvetlendirme katsayısının seçimi (hedeften röle – hedef arası kanal bilgisinin röleye beslenmesinin maliyeti ve başarımlarının değerlendirilmesi) bir tasarım ölçütüdür. Aşağı ve yukarı yönlü iletişimin simetrik olduğu sistemlerde anlık (kanal bilgisinin ters yöndeki aktarımlarda paket başlıklarına eklenmesi), aşağı ya da yukarı yönlü iletişimin baskın olduğu sistemlerde ortalama kuvvetlendirme katsayısını kullanmak iyi bir seçim olarak verilebilir.

## 2.4 İşbirlikli İletişim Sistemlerinde İletim Ortamının Kullanımı

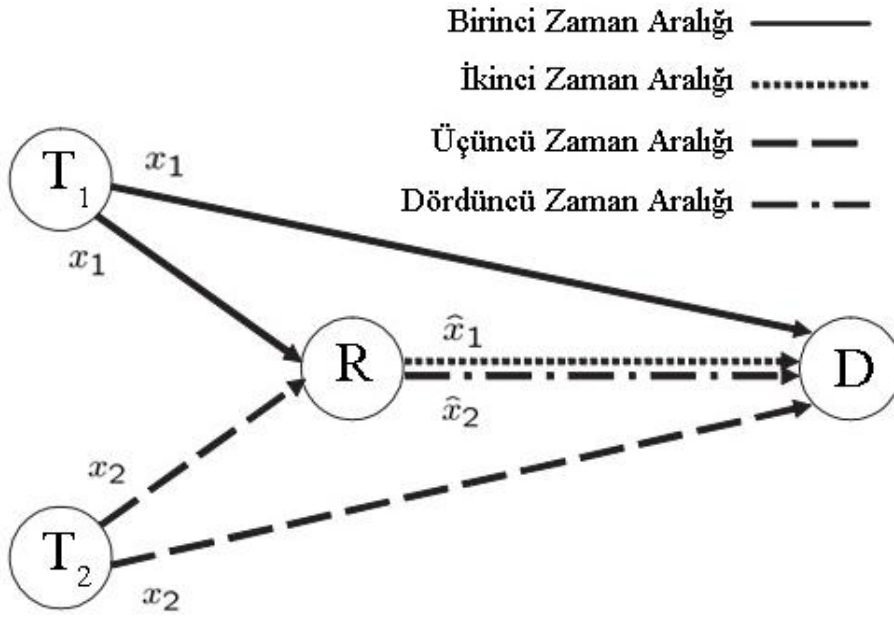
### 2.4.1 Geleneksel yapı

Klasik olarak kullanılan, en basit ve karmaşıklığı düşük, rölenin ağdaki herhangi bir düğümüne çalıştığı durumdur. İşbirlikli iletişim sistemleri ilk olarak ortaya atıldığında daha çok bu yapı üzerinde çalışılmıştır. Fakat; kodlama kazancı yüksek olsa da kaynak verimliliği, dolayısıyla sistem hızı açısından başarımları düşüktür. Bu yüzden daha verimli olan ağ kodlamalı ve fiziksel katman ağ kodlamalı sistemlere yönelinmiştir günümüzde.

Şekil 2.7’de iki kullanıcı için verilmiş sistemde birinci zaman aralığında  $T_1$ , ikinci zaman aralığında  $T_1$ ’in bilgi işareti için R, üçüncü zaman aralığında  $T_2$  ve dördüncü zaman aralığında  $T_2$ ’nin bilgi işareti için R iletimde bulunur. Sonuç olarak hedef biriminde dört zaman aralığı sonucunda  $T_1$  ve  $T_2$ ’nin bilgi işaretlerinin iki farklı kopyası elde edilmek kaydıyla uzay çeşitlemesi sağlanmış olur.

Şekil 2.7’den de görüleceği üzere  $T_1$ ,  $T_2$ ’nin  $x_1$  ve  $x_2$  bilgi işaretleri dört zaman aralığı sonunda hedefe aktarılmakta, yani kanal kullanımı başına iletilen simge sayısı (bant verimliliği) 0.5 olmaktadır. Benzer şekilde  $N$  kullanıcı yapı için tek röle üzerinden çeşitleme sağlanması kaydıyla iletim yapılması durumunda  $2N$ ’lik zaman

aralığına ihtiyaç duyulacaktır. Sonuç olarak  $N$  kullanıcıli sistem için de bant verimliliğinin 0.5 olduğu söylenebilir.



Şekil 2.7 : Klasik işbirlikli sistem.

Temel olarak Şekil 2.7'deki sistem için durum birinci zaman aralığı sonunda röle ve hedefte elde edilen işaretler sırasıyla

$$y_{1R} = h_{1R} \sqrt{P_1} x_1 + n_{1R}, \quad (2.20)$$

$$y_{1D} = h_{1D} \sqrt{P_1} x_1 + n_{1D} \quad (2.21)$$

olarak verilir ve rölenin  $x_1$  bilgi işareti üzerindeki kestirimi

$$\hat{x}_1^R = \text{Arg} \min_{x_a \in A} \{ |y_{1R} - h_{1R} \sqrt{P_1} x_a|^2 \} \quad (2.22)$$

uyarınca hesaplanır. İkinci zaman aralığı sonunda ise hedefte  $T_1$ 'in bilgi işaretine ilişkin

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{P_R} \hat{x}_1^R + n_{RD} \quad (2.23)$$

eşitliği verilir. İki zaman aralığı sonunda hedef, röle ve kaynaktan aldığı  $x_1$  ve  $\hat{x}_1^R$  kopyalarını en büyük olabilirlikli çözücü yardımıyla

$$\hat{x}_1^D = \text{Arg} \min_{x_a \in A} \{ |y_{1D} - h_{1D} \sqrt{P_1} x_a|^2 + |y_{RD} - h_{RD} \sqrt{P_R} x_a|^2 \} \quad (2.24)$$

şeklinde hesaplar. Üçüncü zaman aralığı ve dördüncü zaman aralığında benzer yaklaşım  $T_2$  için yapılarak  $\hat{x}_2^D$  de hesaplanabilir.

Bu bölümde incelenen, Şekil 2.7’de verilen ve çıkarımları yapılan yapı ortak bir hedefin olduğu varsayımı altında irdelenmiş olup iki yönlü sistemlere kolaylıkla devşirilmesi mümkündür. İkinci bir husus ise temel anlamda verilen analizlerin rölede çöz ve aktar tekniği kullanıldığı varsayımıyla verildiğidir. Rölede diğer iletim tekniklerinin kullanılması pekala mümkündür.

#### 2.4.2 Ağ katmanı kodlaması

Ağ kodlamalı sistemler, klasik işbirlikli sistemlerden farklı olarak rölenin işaretleşme veriminin arttırıldığı sistemlerdir. Genel anlamda Şekil 2.8’den de görüleceği üzere kaynak birimleri  $T_1$  ve  $T_2$ ’nin işaretleşmesine yönelik bir farklılık bulunmamaktadır. Birinci zaman aralığında  $T_1$ , ikinci zaman aralığında ise  $T_2$  röle ve hedefe bilgi işaretlerini iletmektedirler. Üçüncü zaman aralığında ise röle elde ettiği  $x_1$  ve  $x_2$  kestirimlerini bit düzeyinde toplayarak (XOR; modülo 2 toplam) hedef birime iletir. Sonuç olarak; iki kaynağın bilgi dizisi üç zaman aralığı sonucunda röle üzerinden alınan ikinci kopyalarıyla birlikte uzay çeşitlemesi sağlanarak hedef alıcı girişinde elde edilmiş olur. Bu sistem için bant verimliliğinin  $0,6$  olduğundan bahsetmek mümkündür.

$N$  kullanıcıli sistem için ise iletişim  $N+1$  zaman periyodunda tamamlanır ve bant verimliliği  $N/(N+1)$  olarak verilir.  $N$  kullanıcı sayısının sonsuza gittiği durum için bant verimliliğinin 1’e, en büyük bant verimliliği değerine, yakınsadığı söylenebilir.

Temel olarak Şekil 2.8’deki sistem için birinci zaman aralığı sonunda röle ve hedefte elde edilen işaretler sırasıyla (2.20) ve (2.21)’deki gibi verilebilir. Rölenin  $x_1$  kestirimi de (2.22) ile aynı olacaktır. İkinci zaman aralığı sonunda ise röle ve hedef girişinde oluşan işaretler

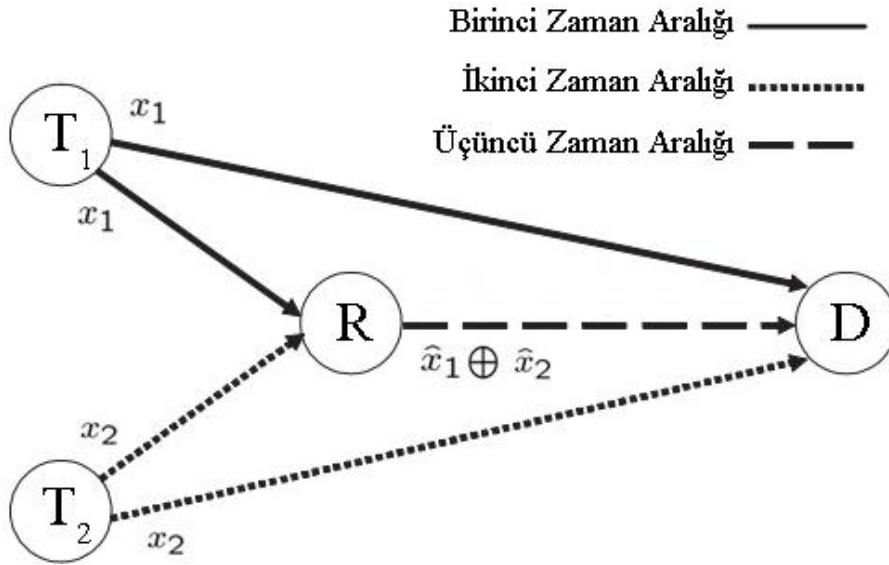
$$y_{2R} = h_{2R} \sqrt{P_2} x_2 + n_{2R}, \quad (2.25)$$

$$y_{2D} = h_{2D} \sqrt{P_2} x_2 + n_{2D} \quad (2.26)$$

ve rölenin  $x_2$  kestirimi

$$\hat{x}_2^R = Arg \min_{x_a \in A} \{ |y_{2R} - h_{2R} \sqrt{P_2} x_a|^2 \} \quad (2.27)$$

olarak verilir.



**Şekil 2.8 : Ağ kodlamalı sistem yapısı.**

Üçüncü zaman aralığında ise röle  $\hat{x}_1^R$  ve  $\hat{x}_2^R$  üzerinden hesapladığı

$$X_R = \hat{X}_1^R \oplus \hat{X}_2^R \quad (2.28)$$

işaretini kullanarak hedefe iletimde bulunur ve hedef alıcı girişinde elde edilen işaret

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{P_R} x_R + n_{RD} \quad (2.29)$$

olarak verilir. Bir çevrimlik iletişim sonunda ise hedef (2.21), (2.26) ve (2.29)'da verildiği üzere elde ettiği işaretler yardımıyla  $\hat{x}_1^D$  ve  $\hat{x}_2^D$  kestirimlerinde bulunur:

$$\hat{x}_1^D = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{ |y_{1D} - h_{1D} \sqrt{P_1} x_a|^2 + |y_{RD} - h_{RD} \sqrt{P_R} x_b|^2 \}, \quad (2.30)$$

$$\hat{x}_2^D = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{ |y_{2D} - h_{2D} \sqrt{P_2} x_a|^2 + |y_{RD} - h_{RD} \sqrt{P_R} x_b|^2 \}. \quad (2.31)$$

Burada dikkat edilmesi gereken nokta A düzeyli modülasyonlu işaretlerle yapılan işaretleşme için (2.30)'daki  $x_b$  'nin

$$x_b = x_a \oplus x_2 \quad (2.32)$$

(2.31)'deki  $x_b$  'nin

$$x_b = x_a \oplus x_1 \quad (2.33)$$

olmasıdır. (2.32) ve (2.33)'den elde edilen en önemli sonuç,  $T_1$  için çeşitleme sağlanabilmesinin koşulunun  $T_2$ 'nin bilgi işareti  $x_2$  'nin hedefte hatasız çözülmüş olmasının gerekliliği,  $T_2$  için çeşitleme sağlanabilmesinin koşulunun da  $T_1$ 'in bilgi işareti  $x_1$  'in hedefte hatasız çözülmüş olmasının gerekliliğidir.

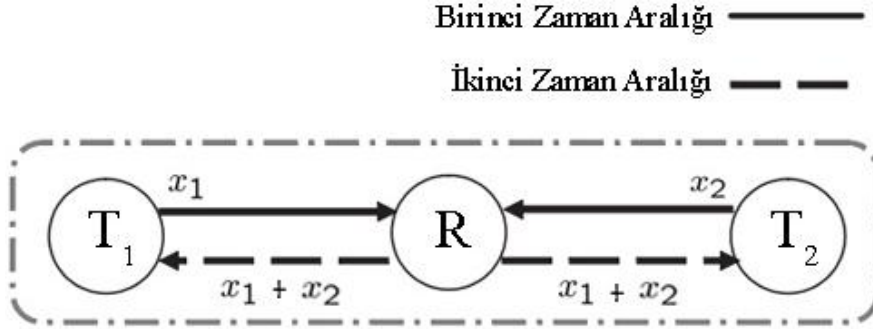
Hatasız iletim ortamında hedefin birinci zaman aralığı sonunda  $x_1$ , ikinci zaman aralığı sonunda  $x_2$  ve üçüncü zaman aralığı sonunda  $x_1 \oplus x_2$  kestirimlerinde bulunacağı söylenebilir. Böylece üçüncü zaman aralığı sonunda elde ettiği  $x_1 \oplus x_2$  'nin bir ve ikinci zaman aralığı sonucunda elde ettiği  $x_1$  ve  $x_2$  'yle sırasıyla xor'lanması neticesinde  $(x_1 \oplus x_2) \oplus x_1 = x_2$  ve  $(x_1 \oplus x_2) \oplus x_2 = x_1$  olduğu görülebilir. Buradan da (2.32) ve (2.33)'de elde edilen çıkarımlara ulaşılır.

Ağ katmanı kodlamasının yukarıda verilen diğer kullanıcıların işaretlerinin hatasız iletilmiş olması varsayımı ortak hedefli yapılar için sistemin pratikte uygulanabilirliğini düşürmektedir. İki yönlü röleli sistemlerde ise kaynak birimler kendi işaretlerini mutlak kesinlikte bildikleri için röleden aldıkları  $x_1 \oplus x_2$  şeklindeki işareten kendi işaretlerini hatasız bir şekilde temizleyebilirler. Bu yüzden ağ kodlamalı sistemler yukarıda anlatıldığı şekliyle iki yönlü röleli sistemlerde kullanılmaya uygundur. Öte yandan, ortak hedefli sistemler için bahsedilen bu problem uygun ön kodlayıcı tasarımlarıyla aşılabılır.

#### 2.4.3 Fiziksel katman ağ kodlaması

İlk olarak Zhang [19] tarafından ortaya atılan fiziksel katman ağ kodlaması, ağ kodlamalı sistemlerde bit düzeyinde (çözülmüş simgeler) sağlanan toplamsallığı modüleli işaretler üzerinde sağlamaktadır. Dolayısıyla röle biriminin kullanıcı işaretlerini ayrı ayrı çözme ihtiyacı ortadan kalkmıştır. Sonuç olarak Şekil 2.9'da

verilen iki kullanıcıli sistemde  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin eş – zamanlı iletimi mümkün olmakta ve tüm iletim iki zaman aralığı sonunda sağlanabilmektedir. Bu bilgiler ışığında sistemin bant verimliliği, iki zaman aralığı sonunda iki bilgi işaretinin karşılıklı iletimi tamamlandığı için 1 olarak verilir.



**Şekil 2.9 :** İki yönlü röleli sistemlerde fiziksel katman ağ kodlaması.

İki yönlü röleli sistemlerde kullanıcı sayısını arttırmak mümkün olmadığı için  $N$  kullanıcıli sistemlerle fiziksel katman ağ kodlamasının başarımını irdelemek Şekil 2.9'daki tasarımla mümkün değildir. Fakat Bölüm 3'te verilen ve fiziksel katman ağ kodlamasının türevi olan karmaşık düzlem ağ kodlamalı sistemler göstermiştir ki fiziksel katman ağ kodlamalı sistemler  $N$  kullanıcı yaklaşımı altında da en büyük bant verimliliğini (1) korumaktadır.

Şekil 2.9'da verilen yapının matematiksel çıkarımlarını irdeleyecek olursak birinci zaman aralığı sonunda röle alıcı girişinde elde edilen  $y_R$  işareti

$$y_R = h_{1R}\sqrt{P_1}x_1 + h_{2R}\sqrt{P_2}x_2 + n_R \quad (2.34)$$

olarak verilir. Rölede kuvvetlendir ve aktar tekniğinin kullanıldığı durum için ikinci zaman aralığı sonunda  $T_1$  ve  $T_2$  alıcı girişindeki işaretler  $y_{R1}$  ve  $y_{R2}$

$$y_{R1(R2)} = h_{R1(R2)} \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_1 + P_2 + N_0}} y_R + n_{R1(R2)} \quad (2.35)$$

olur. (2.35) açılacak olursa

$$y_{R1(R2)} = h_{R1(R2)} \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_1 + P_2 + N_0}} (h_{1R}\sqrt{P_1}x_1 + h_{2R}\sqrt{P_2}x_2 + n_R) + n_{R1(R2)} \quad (2.36)$$

elde edilir. Sistemdeki düğümlerde mükemmel kanal bilgisinin (Perfect CSI) olduğu durum için her iki kaynak kendi işaretlerini aldıkları  $y_{R1,R2}$  işaretinden çıkarırlarsa  $T_1$ 'de

$$y_{R1} = h_{R1} \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_1 + P_2 + N_0}} (h_{2R} \sqrt{P_2} x_2 + n_R) + n_{R1} \quad (2.37)$$

$T_2$ 'de ise

$$y_{R2} = h_{R2} \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_1 + P_2 + N_0}} (h_{1R} \sqrt{P_1} x_1 + n_R) + n_{R2} \quad (2.38)$$

yazılabilir. Böylece en büyük olabilirlikli alıcı ile  $T_1$  ve  $T_2$ 'deki  $x_2$  ve  $x_1$  kestirimleri sırasıyla

$$\hat{x}_2^1 = \text{Arg} \min_{x_b \in A} \{ |y_{R1} - \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_1 + P_2 + N_0}} (h_{R1} h_{2R} \sqrt{P_2} x_b) |^2 \}, \quad (2.39)$$

$$\hat{x}_1^2 = \text{Arg} \min_{x_b \in A} \{ |y_{R2} - \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{P_1 + P_2 + N_0}} (h_{R2} h_{1R} \sqrt{P_1} x_b) |^2 \} \quad (2.40)$$

uyarınca hesaplanır. Benzer çıkarımlar çöz ve aktar ve diğer röle iletim teknikleriyle de yapılabilir. Rölede çözümleme yapıldığı durumda ya  $x_1 \neq x_2$  için  $x_1 + x_2 \neq x_2 + x_1$  sağlayabilecek ön kodlayıcılar kullanmak [20] ya da  $x_1$  ve  $x_2$ 'nin ayrı ayrı çözülebilmesini gerektirmeyecek [19] kodlama matrisleri kullanmak gerekmektedir.

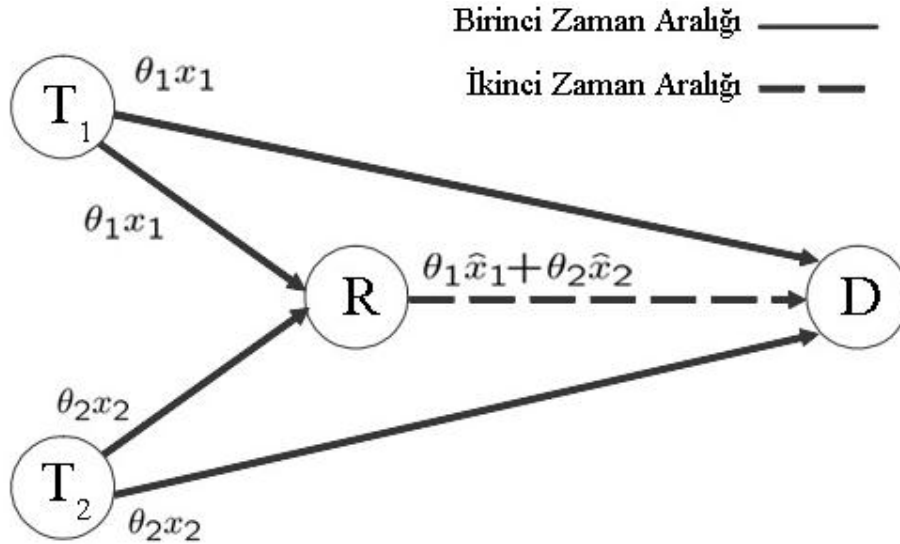


### 3. KARMAŞIK DÜZLEM AĞ KODLAMASI ve İŞBİRLİKLİ İLETİŞİM

#### 3.1 Genel Sistem Yapıları

Bu bölümde, şu ana kadar incelediğimiz işbirlikli iletişim tekniklerini bir adım öteye taşıyarak sistem sığasının karmaşık düzlem ağ kodlaması yardımıyla nasıl artırılabilirliğini irdelleyeceğiz. Tasarım klasik ağ kodlamalı sistemlere göre sığa ve taşınan bilgi bakımından daha yüksek başarımlar göstermekte olup tek röleli ve iki kullanıcılı örnek sistem yapısı Şekil 3.1'de görülmektedir. Söz konusu tasarımın  $N$  kullanıcı ve  $M$  röleli sisteme genellenmesi mümkündür.

Karmaşık düzlem ağ kodlaması önceki bölümlerde irdelenmiş olan ağ kodlaması, fiziksel katman ağ kodlaması gibi sistemlere karşı kaynak kullanımı, hata başarımı, farklı iletişim sistemi mimarilerine genellenebilmesi gibi açılardan üstünlük taşıırken, Şekil 3.1'de verilen örnek ağ yapısının röleli işbirliği halinde tam çeşitleme sağladığı bu bölümde gösterilecektir.



Şekil 3.1 : İki kullanıcı için karmaşık düzlem ağ kodlamalı sistem yapısı.

Şekil 3.1'den görüldüğü üzere sistemdeki tüm kaynak birimleri birinci zaman aralığında, kanaldaki olanakları tümüyle ortak kullanarak (frekans, zaman, kod) röle ve hedefe iletim yapmaktadırlar. İkinci zaman aralığında ise röle kaynaklardan

elde ettiği işaretleri çeşitli tekniklerle çözümleyerek yahut kuvvetlendirerek kaynağa iletmektedir. Sistemdeki tüm düğümler tek antenli olup hedefte, doğrudan kaynaklardan ve röleden ikinci kopyası alınan işaretler için çeşitleme sağlanmaktadır. Bu yapı, Zhang tarafından önerilen [11] ortak bir hedefin bulunmadığı  $T_1$ -R- $T_2$  iletişim yapısını da içermektedir. Kompleks düzlem ağ kodlaması irdelenirken röle ara biriminde kuvvetlendir ve aktar, seçici çöz ve aktar, akıllı çöz ve aktar teknikleri tercih edilmiş; çöz ve aktar tekniği değerlendirmeye alınmamıştır. Bu seçimde temel etken çöz ve aktar tekniğinin işbirlikli sistemlerde tam çeşitleme sağlayamıyor olması neticesinde başarımlar yönünden darboğaz teşkil etmesi temel etkindir.

Tüm bu bilgiler ışığında genel sistem yapısını modelleyecek olursak  $t_1$  gibi bir anda  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin eş – zamanlı iletim yapabileceği bir tasarımla  $t_1 + T$ ,  $T$  iletim periyodu olmak üzere, birinci zaman aralığı sonunda rölede elde edilen  $y_R$  işareti

$$y_R = h_{1R}\sqrt{P_1}\theta_1x_1 + h_{2R}\sqrt{P_2}\theta_2x_2 + n_R \quad (3.1)$$

olarak verilebilir. Burada  $x_1$ ,  $x_2$   $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının bilgi işareti taşıyan modüle edilmiş işaretlerini,  $P_1$ ,  $P_2$  iletim güçlerini gösterirken  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  standart modülasyonlu işaretleri karmaşık düzlemde döndürmek için kullanılan faz bileşenlerini göstermektedir.  $h_{1R}$ ,  $h_{2R}$  kaynaklar ile röle arasındaki kanal sönümleme katsayılarını,  $n_R$  ise ilk zaman aralığı sonunda röle alıcı anten girişindeki gürültüyü göstermektedir.

$\theta$ 'nın seçimi  $i$ . kullanıcı için şu kurala göre yapılabilir:

$$\theta_i = e^{j\pi(4n-1)(i-1)/2N}, N = 2^k, \quad (3.2)$$

$$\theta_i = e^{j\pi(6n-1)(i-1)/3N}, N = 3 \times 2^k. \quad (3.3)$$

(3.2) ve (3.3)'te verilen  $N$ , sistemdeki kullanıcı sayısını gösterirken iki ve katları sayısındaki kullanıcı sayısı için (3.2), üç ve katları sayısındaki kullanıcı için (3.3)'e göre seçim yapılır. Seçimi  $n=1, \dots, N$  kuralınca yapılan  $n$  herhangi bir tam sayıdır.

Röle elde ettiği  $y_R$  işaretinden en büyük olabilirlikli sezici yardımıyla  $\hat{x}_1$  ve  $\hat{x}_2$  kestirimlerini istatistiksel bağımlı ancak bilgi kaybı olmadan yapabilir. Söz konusu istatistiksel bağımlılık kodlama kazancında bir miktar kayba neden olsa da zamanda, frekansta ya da kodlamada çoğullama yapmaksızın farklı kullanıcıların iletim ortamını kullanmasını mümkün kılmaktadır. Daha da önemlisi, işbirlikli ya da işbirlikli ve çok girişli - çok çıkışlı sistemler için en büyük çeşitleme kazancını koruyabilmektedir.

Birinci iletim aralığında kaynakların yaptığı iletim rölede olduğu gibi hedef alıcı anten girişinde de bir işaretin oluşmasını tetikleyecektir. Bu işaret matematiksel olarak

$$y_D = h_{1D}\sqrt{P_1}\theta_1x_1 + h_{2D}\sqrt{P_2}\theta_2x_2 + n_D \quad (3.4)$$

şeklinde karakterize edilebilir. (3.4)'te  $h_{1D}$ ,  $h_{2D}$  kaynaklar ile hedef arasındaki kanal sönmüleme katsayıları,  $n_D$  ise hedef alıcı anten girişindeki gürültüyü göstermektedir.

İkinci zaman aralığında işaretleşme röle ile hedef arasında olacaktır. Röle birinci zaman aralığında elde ettiği işaretleri çeşitli tekniklerle işleyerek hedefe aktarmaktadır. Bölüm 3.1.1, 3.1.2 ve 3.1.3'te sırasıyla kuvvetlendir ve aktar, seçici çöz ve aktar, akıllı çöz ve aktar yöntemlerinin rölede kullanılması durumunda sistem yapıları incelenmiştir.

### 3.1.1 Rölede kuvvetlendir ve aktar yöntemi

Bu tekniğin kullanılması durumunda röle (3.1)'de aldığı işareti ölçekleyerek hedefe aktaracaktır. Sistemde  $P_1$  ve  $P_2$  kaynak birimlerin,  $P_R$  ise rölenin her bir kaynağın işareti için iletim gücünü göstermek üzere

$$P_1 = P_2 = P_R \quad (3.5)$$

şeklinde tüm düğümlerde her simge işareti için eşit güçte iletim yapıldığını düşünelim. Rölenin  $t_1$  anında aldığı, (3.1)'de gösterilen işaretin gücü

$$P_{y_R} = E[y_R y_R^*] \quad (3.6)$$

olacaktır. (3.6)'yı biraz daha açacak olursak

$$\begin{aligned}
P_{y_R} &= E[(h_{1R}\theta_1x_1 + h_{2R}\theta_2x_2 + n_R)(h_{1R}^*\theta_1^*x_1^* + h_{2R}^*\theta_2^*x_2^* + n_R^*)] \\
&= E[|h_{1R}|^2]E[|\theta_1x_1|^2] + E[|h_{2R}|^2]E[|\theta_2x_2|^2] + E[|n_R|^2] \\
&= \sigma_{1R}^2P_1 + \sigma_{2R}^2P_2 + N_0
\end{aligned} \tag{3.7}$$

olarak verilebilir. Burada  $h_{1R}$ ,  $h_{2R}$ ,  $n_R$  rastlantısal değişkenleri istatistiksel bağımsız ve  $h_{iR} \sim CN(0, \sigma_{iR}^2)$  ( $i=1, 2$  olmak üzere),  $n_R \sim CN(0, N_0)$  olarak seçilmiştir. İfadeyi basitleştirmek adına  $\sigma_{1R}^2 = \sigma_{2R}^2 = 1$ ,  $P_1 = P_2 = P_R = P$  ve  $N_0 = 1$  olarak seçilirse rölenin aldığı işareti  $2P/(2P+1)$  gibi bir katsayı ile ölçekleyeceği ( $\beta = 1/(2P+1)$ ) öngörülebilir. Bu durumda ikinci zaman aralığı sonunda hedefte elde edilen işaret

$$\begin{aligned}
y_{RD} &= h_{RD}\sqrt{\beta P_R}y_R + n_D \\
&= h_{RD}\sqrt{\beta P_R}\sqrt{P_1}h_{1R}\theta_1x_1 + h_{RD}\sqrt{\beta P_R}\sqrt{P_2}h_{2R}\theta_2x_2 + h_{RD}\sqrt{\beta P_R}n_R + n_D
\end{aligned} \tag{3.8}$$

şeklinde verilir. (3.8)'de  $h_{RD}$  röle ile hedef arasındaki kanalı,  $n_D$  ise hedef alıcı anten girişindeki gürültüyü göstermektedir. Hedef alıcı girişinde birinci ve ikinci zaman aralığında elde edilen işaretler en büyük olabilirlikli sezici yardımıyla çözülerek  $\hat{x}_1^D$  ve  $\hat{x}_2^D$  kestirimleri

$$\begin{aligned}
\hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D &= \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{ |y_D - h_{1D}\sqrt{P_1}\theta_1x_a - h_{2D}\sqrt{P_2}\theta_2x_b|^2 \\
&\quad + |y_{RD} - h_{RD}h_{1R}\sqrt{P_1\beta P_R}\theta_1x_a - h_{RD}h_{2R}\sqrt{P_2\beta P_R}\theta_2x_b|^2 \}
\end{aligned} \tag{3.9}$$

şeklinde elde edilebilir. (3.9)'da  $x_a$  ve  $x_b$   $A$  kümeli simge uzayındaki işaret durumlarını göstermektedir.

### 3.1.2 Rölede akıllı sez ve aktar yöntemi

Akıllı sez ve aktar yönteminde röle kaynakların bilgi işaretlerini çözmekte ve  $T_1$ -R ve  $T_2$ -R iletim hatlarının bozucu etkisiyle ilintili çıkış gücünde iletim yapmaktadır. Bu iletim gücü her bir kullanıcı işareti için  $P_R$  ile üstten sınırlandırılmış olup  $T_1$ -R,  $T_2$ -R hatlarındaki işaret-gürültü oranlarının dB olarak eksi sonsuza gittiği durumda sıfıra, sonsuza gittiği durumda  $P_R$ 'ye yakınsamaktadır. Bu bilgilerin ışığında rölede

$\hat{x}_1^R$  ve  $\hat{x}_2^R$  kestirimleri

$$\hat{x}_1^R, \hat{x}_2^R = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{|y_R - h_{1R}\sqrt{P_1}\theta_1 x_a - h_{2R}\sqrt{P_2}\theta_2 x_b|^2\} \quad (3.10)$$

şeklinde verilebilir. İkinci zaman aralığında rölenin ilettiği işaretler ise hedefte

$$y_{RD} = h_{RD}\sqrt{\alpha}(\theta_1\hat{x}_1 + \theta_2\hat{x}_2) + n_{RD} \quad (3.11)$$

olacaktır. (3.11)'de  $h_{RD}$  röle ile hedef arasındaki sönmüleme katsayısı,  $n_{RD}$  ise hedef alıcı anten girişindeki gürültüyü göstermektedir.  $\alpha$  ise rölenin seçmiş olduğu kuvvetlendirme katsayısı olup kaynaklarla ve hedefle arasındaki kanal işaret – gürültü oranlarının bir fonksiyonu olarak verilmektedir. Karmaşık düzlem ağ kodlaması işbirlikli iletişim yapılarında akıllı sez ve aktar yöntemi kuvvetlendirme katsayısının seçimi Bölüm 2.3.4'te gösterilmiş ve [28]'de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Hedefte iki iletim zaman aralığı sonunda elde edilen işaretler en büyük olabilirlikli sezici yardımıyla çözülürse

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{ & |y_D - h_{1D}\sqrt{P_1}\theta_1 x_a - h_{2D}\sqrt{P_2}\theta_2 x_b|^2 \\ & + |y_{RD} - h_{RD}\sqrt{\alpha}\theta_1 x_a - h_{RD}\sqrt{\alpha}\theta_2 x_b|^2 \} \end{aligned} \quad (3.12)$$

elde edilir.

### 3.1.3 Rölede seçici çöz ve aktar yöntemi

Seçici çöz ve aktar yönteminde rölede yapılan kestirim (3.10)'daki gibi

$$\hat{x}_1^R, \hat{x}_2^R = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{|y_R - h_{1R}\sqrt{P_1}\theta_1 x_a - h_{2R}\sqrt{P_2}\theta_2 x_b|^2\} \quad (3.13)$$

şeklinde dir. Hata yayılımının fazlalık bitleri yoluyla engellenmiş olması dolayısıyla bir çerçevelik bit dizisinin çözülmesinin ertesinde  $T_1, T_2$ 'nin bilgi dizilerin herhangi bir bitinin hatalı sezilip sezilmediğine karar verilir. Hata yapılmış olması durumunda röle çerçeve boyunca söz konusu kullanıcı için bu çerçeveyi iletmeyecektir. Bu nedenle de kaynak - röle arası düşük işaret – gürültü oranlarında (SNR) seçici çöz ve aktar yöntemi arzulanan çeşitleme derecesini sağlayamamaktadır. Buna karşın yüksek SNR değerlerinde bu handikap ortadan kalkmakta, en büyük çeşitleme derecesine ulaşılmaktadır. İki kaynaklı sistem için rölede bir çerçevelik kaynak

iletimi sonunda dört farklı durum oluşabilir.  $x_e$  hatalı çözölen bit sayısını,  $N_f$  çerçeve uzunluğunu (hata kontrolünün yapıldığı en küçük simge dizisi),  $C[x_e, N_f]$  bir çerçevelik iletim süresince  $T_i$  ( $i = 1, 2$ ) kaynağının röle tarafından hatalı çözölen bit sayısını göstermek üzere şu durumlarla karşılaştırılabilir:

a.  $C_1[x_e, N_f] = 0, C_2[x_e, N_f] = 0$

Her iki kullanıcı için de röleden iletim yapılacak olup ikinci zaman aralığı sonunda hedefte elde edilen işaret

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{P_R} (\theta_1 \hat{x}_1 + \theta_2 \hat{x}_2) + n_{RD} \quad (3.14)$$

olur ve  $\hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D$  kestirimleri

$$\hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{ |y_D - h_{1D} \sqrt{P_1} \theta_1 x_a - h_{2D} \sqrt{P_2} \theta_2 x_b|^2 + |y_{RD} - h_{RD} \sqrt{P_R} \theta_1 x_a - h_{RD} \sqrt{P_R} \theta_2 x_b|^2 \} \quad (3.15)$$

olarak verilir.

b.  $C_1[x_e, N_f] \neq 0, C_2[x_e, N_f] = 0$

Bu durumda yalnız  $T_2$  kullanıcısı için röleden iletim yapılacak olup ikinci zaman aralığı sonunda hedefte elde edilen işaret

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{P_R} \theta_2 \hat{x}_2 + n_{RD} \quad (3.16)$$

olur ve  $\hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D$  kestirimleri

$$\hat{x}_1, \hat{x}_2 = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{ |y_D - h_{1D} \sqrt{P_1} \theta_1 x_a - h_{2D} \sqrt{P_2} \theta_2 x_b|^2 + |y_{RD} - h_{RD} \sqrt{P_R} \theta_2 x_b|^2 \} \quad (3.17)$$

olarak verilir.

c.  $C_1[x_e, N_f] = 0, C_2[x_e, N_f] \neq 0$

Bu durumda ise yalnız  $T_1$  kullanıcısı için röleden iletim yapılacak olup ikinci zaman aralığı sonunda hedefte elde edilen işaret

$$y_{RD} = h_{RD}\sqrt{P_R}\theta_1\hat{x}_1 + n_{RD} \quad (3.18)$$

olur ve  $\hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D$  kestirimleri

$$\begin{aligned} \hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{ & |y_D - h_{1D}\sqrt{P_1}\theta_1x_a - h_{2D}\sqrt{P_2}\theta_2x_b|^2 \\ & + |y_{RD} - h_{RD}\sqrt{P_R}\theta_1x_a|^2 \} \end{aligned} \quad (3.19)$$

olarak verilir.

$$d. C_1[x_e, N_f] \neq 0, C_2[x_e, N_f] \neq 0$$

Her iki kullanıcı için de çerçevelerin hatasız çözülememesi durumunda ikinci zaman aralığında hedef birime herhangi bir işaret iletilmez ve hedef birinci zaman aralığında kaynaklardan aldığı işaretler yardımıyla  $\hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D$  kestirimlerinde bulunur:

$$\hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} \{|y_D - h_{1D}\sqrt{P_1}\theta_1x_a - h_{2D}\sqrt{P_2}\theta_2x_b|^2\}. \quad (3.20)$$

Burada dikkat edilmesi gereken nokta "a" durumunda her iki kaynağın işaretleri için, "b" durumunda yalnız  $T_2$ 'nin, "c" durumunda yalnız  $T_1$ 'in işaretleri için çeşitleme kazancı elde edilirken "d" durumunun oluşması halinde çeşitleme söz konusu değildir. Ayrıca  $C_i[x_e, N_f] = 0$  olması durumunda ( $i = 1, 2$ ) bir çerçeve boyunca  $T_i$ 'nin  $x_i$  bilgi dizisi vektörü rölede doğru çözülmüştür ( $\hat{x}_i = x_i$ ); bu nedenle her iletim çevriminde (kaynaklar ve rölenin iletim yaptığı iki zaman aralıklı periyot) ikinci zaman aralığındaki röle iletiminde gösterilen  $\hat{x}_i$  işaretlerini  $x_i$  olarak vermek de mümkündür.

### 3.2 Başarım Analizi

Başarım analizi kapsamında yeterince büyük işaret – gürültü oranı (SNR) değerlerinde çeşitleme derecesinin hata başarımına üstel etki ettiğini göstereceğiz. Bu bilgi ışında, yeterince büyük işaret gürültü oranlarında benzetim sonuçlarının hata başarım eğrilerinde eğimin çeşitleme derecesini göstermesini beklenebilir.

Kaynak – röle, kaynak – hedef ve röle – hedef kanallarında SNR sonsuza götürüldüğünde [20]'ye göre

$$p_e \approx (G_c \bar{\gamma})^{-G_d} \quad (3.21)$$

olup (3.21)'den çeşitleme derecesi  $G_d$  ile hata oranı  $p_e$  arasındaki üstel ters orantı görülebilir. Yine (3.21)'den  $G_c$  kodlama kazancı ile hata oranı arasındaki çarpımsal ilişki görülebilir. Bölüm 3.1'de verilen sistem modelinde her  $T_i$  kaynağının bilgi dizisi iki farklı yoldan iletilmekte olup bunlar  $T_i$ -D, R-D kanalları üzerinden gerçekleşmektedir. Bu bağlamda hedef karar devresi girişinde bilgi dizisinin en büyük oran birleştiricisi (MRC) ile elde edilebildiğini göstermek en büyük çeşitleme derecesinin elde edildiğini göstermeye gerek ve yeter koşuldur.

$T_1$  ve  $T_2$  gibi iki kullanıcılı örnek bir sistem için modüle edilmiş simge kümesinin  $A_x$  olduğunu düşünelim.  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin iletmekte olduğu simgelerin  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  ön kodlayıcılarla kodlanması neticesinde her iki kullanıcı için simge kümeleri ayrıştırılmaktadır. Böylece tüm simge kümesi  $A_u$

$$A_u = A_x^2 \quad (3.22)$$

olarak verilir. Bu bilgiler ışığında Gauss kanaldan birinci zaman aralığında röleye ve hedefe iletilen  $T_1$  ve  $T_2$  bilgi dizisinin alıcı girişinde  $\theta_1 x_1 + \theta_2 x_2$  ve toplamsal Gauss gürültüsü şeklinde ifade edilebileceği görülür.  $\theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 \neq \theta_1 x_2 + \theta_2 x_1$  'dir ve bu bilgi yardımıyla  $A_x$  simge kümesinden  $T_1$  ve  $T_2$  için seçilen her  $x_1$ ,  $x_2$  simgeleri için  $\theta_1 x_1 + \theta_2 x_2$  'nin düzlemde farklı bir işarete izdüşeceği söylenebilir. Özetle  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının tümleşik işareti

$$u = \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 \quad (3.23)$$

şeklinde verilip  $A_u$  düzeyli simge kümesinden seçilir. Gösterim kolaylığı için  $P_1 = P_2 = P_R = 1$  seçilerek Gauss kanal için hedef alıcı girişindeki işaret verilirse

$$y_D = u + n_D \quad (3.24)$$

olur. Sönümlemeli kanallarda ise alıcı girişindeki işareti doğrudan  $u$  ile göstermek mümkün değildir; çünkü  $x_1$  ve  $x_2$  farklı kanallar üzerinden alıcıya

gönderilmektedirler. Bu nedenle (3.24)'te verilmiş olan hedef girişindeki işareti  $h_D u + n_D$  gibi bir yapıda doğrudan yazmak mümkün değildir. Öte yandan [20]'de gösterildiği üzere  $\theta_1 x_1 + \theta_2 x_2$  toplamsal bilgi işaretinin  $|\tilde{h}_D|$  zarflı, fazı normal dağılımlı bir  $\tilde{h}_D$  kanalı üzerinden iletildiği bir sistemle üstten sınırlamak mümkündür. Bu bağlamda birinci zaman aralığında kaynak – hedef arası iletimde alıcı girişinde elde edilen işaret

$$\tilde{y}_D = \tilde{h}_D (\theta_1 x_1 + \theta_2 x_2) + \tilde{n}_D = \tilde{h}_D u + \tilde{n}_D \quad (3.25)$$

olur. [20]'de  $\tilde{h}_D$  kanal katsayısının zarfı

$$|\tilde{h}_D| = d_D^{\min} / d^{\max} \quad (3.26)$$

olarak, bu kanaldaki işaret – gürültü oranı da

$$\tilde{\gamma}_D = |\tilde{h}_D|^2 (d^{\min} / 2)^2 \bar{\gamma} \quad (3.27)$$

şeklinde verilir. Burada  $d^{\min} (d^{\max})$   $u$  simge kümesi elemanları arasındaki en küçük (en büyük) Öklid uzaklığını  $d_D^{\min} (d_D^{\max})$  de alıcı girişindeki  $h_{1D}\theta_1 x_1 + h_{2D}\theta_2 x_2$  işaret kümesinin en küçük (en büyük) Öklid uzaklığını göstermektedir.

Böylece akıllı sez ve aktar yöntemi için (3.11) ve (3.25) kullanılarak alıcı girişindeki işaret en büyük olabilirlikli çözücü yardımıyla

$$\hat{x}_1^D, \hat{x}_2^D = \text{Arg min}_{x_a, x_b \in A} |\tilde{h}_D^* \tilde{y}_D + h_{RD}^* y_{RD} - (|\tilde{h}_D|^2 + |h_{RD}|^2 \sqrt{\alpha})u|^2 \quad (3.28)$$

olarak verilebilir ve (3.28)'ten hareketle röle – hedef arasındaki iletişim yardımıyla alınan fazladan kopyanın en büyük çeşitleme derecesini sağlayabildiği görülür.

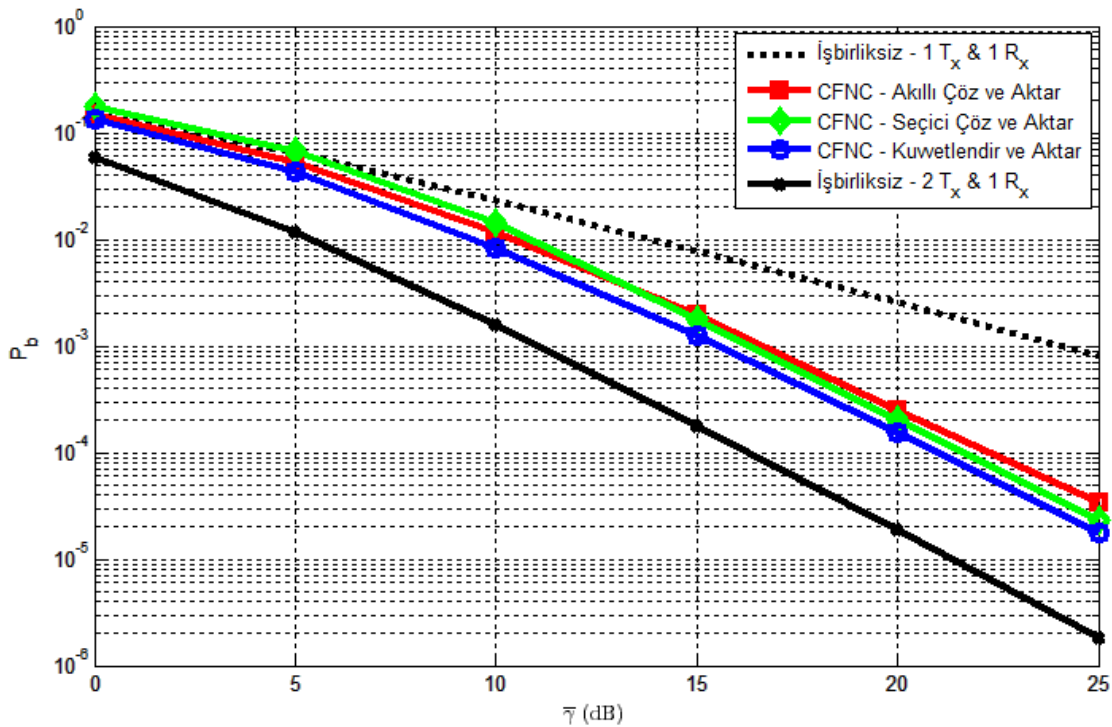
Analizi kuvvetlendir ve aktar, seçici çöz ve aktar yöntemlerine benzer şekilde uygulamak mümkündür; zira bu iki yöntemin yeterince yüksek işaret gürültü oranları için en büyük çeşitleme derecesini sağlayabildiği literatürde yer alan pek çok çalışmada gösterilmiştir [2, 8, 18, 28]. İncelenen röle iletim teknikleri Bölüm 3.3'te de görüleceği üzere çeşitleme derecesine değil kodlama kazancına etki etmektedir.

### 3.3 Benzetim Sonuçları

Benzetim sonuçları 2 kullanıcıli sistemlerde farklı röle davranışları için elde edilmiş olup Bölüm 3.1’de incelenen teknikler için karmaşık düzlem ağ kodlamalı sistem başarımları kaynaklardan herhangi birisi için Şekil 3.2’de verilmiştir. Benzetimler Rayleigh sönümlmeli kanalda BPSK modülasyon için yapılmış olup, alıcı – vericinin olduğu çeşitlemesiz ve 2x1 verici çeşitlemeli sistemlere karşılaştırma yapılmıştır.

Tüm kanallar simetrik ve  $CN(0, \sigma^2)$  dağılımlı alınmış ve  $\sigma^2 = 1$  seçilmiştir. Gürültüler de benzer şekilde  $CN(0, N_0)$  Gauss dağılımlı seçilmiştir.  $SNR_{T,R}$ ,  $SNR_{T,D}$ ,  $SNR_{R,D}$ , sırasıyla  $P_i / N_0$ ,  $P_i / N_0$ ,  $P_R / N_0$  ( $i=1, 2$ ) olarak seçilmiştir.  $P_1 = P_2 = P_R$  olduğu için  $SNR_{T,R} = SNR_{T,D} = SNR_{R,D}$  şeklinde yazılabilir.

Şekil 3.2’den görüleceği üzere karmaşık düzlem ağ kodlaması kodlama kazancında kayba neden olsa da Alamouti’nin önermiş olduğu [5] verici çeşitlemeli sistemin eğimine erişebilmektedir.



**Şekil 3.2 :** İşbirlikli iletişim sistemlerinde karmaşık düzlem ağ kodlaması bit hata başarımları.

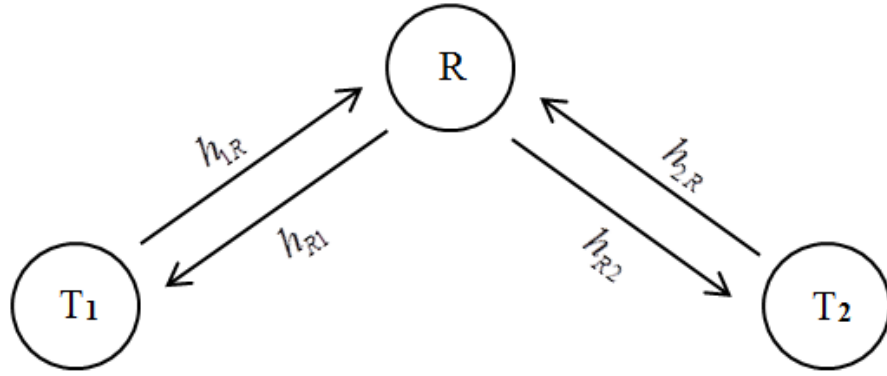
Seçilmiş olan tüm röle davranışları için bu durum geçerli olup standart işbirlikli sistem yapılarındaki iletim teknikleri referans alınabilir. Kaynak – röle arasındaki

SNR değeri arttıkça seçici çöz ve aktar tekniğinin, çeşitleme derecesini yakalayabildiği görülmektedir. Diğer kanallardan bağımsız olarak bu hat üzerindeki SNR'ı sonsuza götürürsek yapı Alamouti'nin eğrisi (güç tüketimi açısından adil karşılaştırma için Alamouti kodu'nun iletim gücü [5]'e göre iki katına çıkarılmıştır – her simgenin  $P_1$  gücüyle iletildiği durum) ile çakışacaktır. Buradan hareketle yeterince yüksek işaret – gürültü oranları için seçici çöz ve aktar tekniğinin kuvvetlendir ve aktar tekniğine üstün olacağını söyleyebiliriz. Sonuçların dikkat çekici başka bir yanı ise kuvvetlendir ve aktar tekniğinin diğer iki yöntemden daha yüksek başarımlar sağlamasıdır. Bu sonucun elde edilmesinde SNR değerlerinin  $P/N_0$  olarak alınması etkindir. Zira kuvvetlendir ve aktar simge tekniği simge başına her zaman  $P$ 'lik güç harcarken, bu değer akıllı ve aktar ve seçici çöz ve aktar sistemleri için  $P$  ile üstten sınırlıdır. Alıcı girişindeki toplam işaret gürültü oranını belirten  $\bar{\gamma}_D = \bar{\gamma}_{T,D} + \bar{\gamma}_{R,D}$  için akıllı sez ve aktar, seçici çöz ve aktar sistemlerinin daha iyi başarımlar göstereceği literatürde gösterilmiştir [28].



#### 4. İKİ YÖNLÜ RÖLELİ SİSTEMLER VE İLETİM SİĞASI

Bölüm 2’de anlatılan iki yönlü röleli sistemler noktadan noktaya karşılıklı aktarımın yapıldığı veya yukarı ve aşağı yönlü iletimin simetrik olduğu sistemler için idealdir. Bu kısımda yapılan çıkarımlar Şekil 4.1’de verilmiş olan sistem için yapılacaktır.



Şekil 4.1 : İki yönlü röleli sistem yapısı.

Kısaca açıklanacak olursa; Şekil 4.1’de verilen iki yönlü sistemde  $T_1$  ve  $T_2$  kaynakları röle üzerinden iletişim sağlamaktadır. Birinci kaynak birimi olan  $T_1$  ile röle birimi  $R$  arasındaki yukarı yönlü kanal  $h_{1R}$ , aşağı yönlü kanal  $h_{R1}$  ile gösterilmiştir. Benzer şekilde ikinci kaynak birimi olan  $T_2$  ile röle birimi  $R$  arasındaki yukarı yönlü kanal  $h_{2R}$ , aşağı yönlü kanal  $h_{R2}$  ile gösterilmiştir.

Önce kaynakların farklı zaman aralıklarında ve aynı anda iletimde bulunduğu sistem modelleri rölede çöz ve aktar tekniğinin kullanılması yaklaşımı altında, sonrasında ise kaynakların aynı anda iletimde bulunduğu sistem modeli rölede kuvvetlendir ve aktar tekniğinin kullanılması yaklaşımı altında irdelenecektir. Tüm bu yapılar için fiziksel katman ağ kodlamalı iletişimden söz edilebilir.

Servis dışı kalma başarımlar ölçütü bit hata oranından farklı olup, iletim hızının anlık kanal sığasının altında kalıp kalmadığıyla ölçülür [10-11, 13, 29].  $i$  ile  $j$  düğümleri arasındaki anlık işaret gürültü oranı

$$\gamma_{ij} = \frac{P |h_{ij}|^2 |x_i|^2}{\sigma_n^2} \quad (4.1)$$

olmak üzere yine  $i$  ile  $j$  düğümleri arasındaki kanal sığası

$$C_{ij} = B \log_2(1 + \gamma_{ij}) \quad (4.2)$$

olarak verilir. Burada  $|x_i^2|$  modülasyonlu kaynak bilgi işaretinin gücü,  $B$  ise kanal bant genişliğidir. Bu çalışma boyunca yapılan tüm hesaplamalarda kaynak bilgi işaretleri birim güçlü ( $|x_i^2|=1$ ) olarak alınmıştır. Her bir kanal için iletim hızı üst sınırı ise

$$R^{th} = \frac{C_{ij}}{B} \text{ (bit/sn/Hz)} \quad (4.3)$$

olur. Bu bilgiler ışığında başarılı ve başarısız iletişim yaklaşımları servis dışı kalma olasılığını belirler. Özetle

$$\begin{aligned} \Pr[R_{ij} < R^{th}] &= 1 - p_{ij} \rightarrow \text{Başarılı} \\ \Pr[R_{ij} > R^{th}] &= p_{ij} \rightarrow \text{Başarısız} \end{aligned} \quad (4.4)$$

olup  $p_{ij}$  söz konusu kanal için iletim hızının kanal sığasının üzerinde kalma (servis dışı kalma) olasılığını göstermektedir. Çalışmanın ilerideki bölümlerinde bu olasılıktan sıkça yararlanılacaktır. Shannon'un [30] kanal kapasitesi yaklaşımıyla hesaplanan (4.4)'teki servis dışı kalma olasılıklarının matematiksel çıkarımları ayrıntılı bir şekilde EK B'de verilmiştir.

Bölüm 4 ve Bölüm 5'teki tüm başarımlar hesapları bit iletim ve enerji verimliliği üzerinden yapılmıştır. Bu terimleri kısaca açıklayacak olursak; bit iletim verimliliği, iletişim sisteminin her bir iletim çevrimi sonunda (kaynak ve rölenin iletimlerini tamamlaması) hedefe başarılı olarak iletilen ortalama bit sayısını göstermektedir. Markov zincirleriyle bellek durumları betimlenen sistemlerin her bir bellek durumunun olasılığı ( $p(S_i)$ ) ve bu bellek durumundan yeni bir bellek durumuna (aynı bellek durumuna ya da diğer bir bellek durumuna) geçerken (geçiş olasılığı  $p_i$ ) hedefe başarılı bir şekilde aktarılan bit sayısı ( $R_x$ ) bit iletim verimliliği hesabını ( $R_x p_i p(S_i)$ ) oluşturur. Tüm sistemin bit iletim verimliliği her bir  $S_i$  bellek durumu için hedefe başarılı bir şekilde aktarılan bit sayısının toplanmasıyla bulunur. Benzer şekilde enerji verimliliği, bir çevrimlik iletim sonunda harcanan toplam enerjinin

hedefe başarılı bir şekilde aktarılan bit sayısına oranlanmasıyla hesaplanır. Özetle enerji verimliliği, hedefe başarıyla aktarılan her bilgi biti için harcanan ortalama enerji miktarıdır. Enerji verimliliği hesabı her bir  $S_i$  bellek durumunda  $p(S_i)$  olasılığıyla bulunan, iletişim sistemi için o bellek durumunda harcanan  $E(S_i)$  enerjisinin tüm bellek durumları için toplanarak, hedefe başarılı bir şekilde aktarılan toplam bilgi bitine ( $\eta$ ) oranlanması olarak verilir.

Bu bilgiler ışığında iki kaynaklı bir sistem için bit iletim verimliliği

$$\eta = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (R_1 I_1[m] + R_2 I_2[m]) \quad (4.5)$$

olup,  $I_i[m]$   $M$  çevrimlik iletişim için  $m$  zaman aralığında  $i$  kaynağı için hedefteki doğru çözme işleminin fonksiyonudur. Bu tez çalışmasında incelenen tüm Markov zincirlerinin durağan ve ergodik olduğu varsayımı altında

$$\eta = R_1 \bar{I}_1 + R_2 \bar{I}_2 \quad (4.6)$$

yazılabilir. Burada  $\bar{I}_i$ ,  $E[I_i[m]]$  olarak verilir. Daha genel olarak ise bit iletim verimliliği

$$\eta = \sum_{i=1}^X (R_1 p(S_i)(1 - p_{out,1}) + R_2 p(S_i)(1 - p_{out,2}) - (R_1 + R_2) p(S_i)(1 - p_{out,1,2})) \quad (4.7)$$

şeklinde kullanılabilir. (4.7)'deki  $X$  sistemin Markov zincirinin uzunluğunu göstermekte olup  $p(S_i)$ ,  $S_i$  bellek durumunun olasılığıdır.  $p_{out,j}$   $j$  kullanıcısının,  $p_{out,1,2}$  ise her iki kullanıcının işaretinin  $p(S_i)$  durumu geçişinde hedefte servis dışı kalma olasılığını göstermektedir.

Benzer şekilde enerji verimliliği;

$$E_b = \frac{P_{tot}}{\eta} = \frac{\sum_{i=1}^X E(S_i) p(S_i)}{\eta} \quad (4.8)$$

olup her bir bellek durumunun enerji tüketimi

$$E(S_i) = \frac{P_{S_i}}{1 - p_{out,S_i}} \quad (4.9)$$

olarak verilir. Burada  $P_{S_i}$   $S_i$  bellek durumunda harcanan enerjiyi,  $p_{out,S_i}$  ise  $S_i$  bellek durumunun çevrim dışı kalma olasılığını (bellek durumunun tekrarlanması ve iletim yapılan düğümde iletilen hiçbir işaretin başarılı çözilememesi durumu) göstermektedir. (4.7) ve (4.8) genelleştirilmiş bit iletim ve enerji verimliliği ifadeleri olup tezin kalan kısımlarında sıkça kullanılacaktır.

Son olarak sistem sığası iletişim sisteminin yeterince yüksek SNR değerinde birim zamanda ulaştığı en büyük iletim hızı olarak verilebilir:

$$C_S = \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \eta(R). \quad (4.10)$$

(4.10)'da  $\eta(R)$   $R$  iletim hızındaki bit iletim verimliliğidir.

Tez çalışmasının geri kalan kısmında başarımlı analizleri hata olasılığı üzerinden yapılmayacak olmasına karşın sistem yapısını anlayabilmek adına her bir zaman aralığında düğümlerde elde edilen işaretleri matematiksel olarak ifade etmek faydalı olacaktır. Aksi belirtilmedikçe dördüncü bölüm boyunca yapılan tüm analizlerde her iki uç birimin iletim hızları  $R_1, R_2$  eşit ve  $R$  olarak, iletim güçleri  $P_1, P_2$  ise yine eşit ve  $P$  olarak alınmıştır. Benzer şekilde sönümlemeli kanal katsayıları  $h_{ij} \sim CN(0, \sigma_{ij}^2)$  dağılımlı olup tüm kanallar için  $\sigma_{ij}^2 = 1$  ve alıcı girişlerindeki toplamsal Gauss gürültüsü  $n_{ij} \sim CN(0, N_0)$  olarak alınmıştır.

## 4.1 Ayırık – Zamanlı Çöz ve Aktar Yöntemi

### 4.1.1 Sistem yapısı

[10]'da irdelenmiş olan kaynak düğümlerin bilgi dizilerini farklı zaman aralıklarında ilettiği Şekil 4.1'de verilen iki yönlü sistem için ilk iletim aralığı sonunda röle girişinde elde edilen  $y_{1R}$  işareti

$$y_{1R} = h_{1R} \sqrt{P} x_1 + n_{1R} \quad (4.11)$$

olarak verilebilir. Burada  $n_{1R}$  röle girişindeki toplamsal gürültüyü göstermektedir. İşaretleşme sonunda röle  $y_{1R}$  'ye dayanarak  $\hat{x}_1^R$  kestiriminde bulunabilir.

İkinci zaman aralığında kaynak düğümün iletimi neticesinde röle girişine gelen  $y_{2R}$  işareti

$$y_{2R} = h_{2R}\sqrt{P}x_2 + n_{2R} \quad (4.12)$$

olarak verilebilir. Benzer şekilde  $n_{2R}$  röle girişindeki toplamsal gürültüyü göstermektedir. Böylece röle  $y_{2R}$  yardımıyla  $\hat{x}_2^R$  kestiriminde bulunabilir.

Üçüncü zaman aralığında ise röle iletim yapacaktır ve kaynak birimlerin girişlerine gelen işaretler

$$y_{R1} = h_{R1}\sqrt{P_R}(\hat{x}_1^R + \hat{x}_2^R) + n_{R1}, \quad (4.13)$$

$$y_{R2} = h_{R2}\sqrt{P_R}(\hat{x}_1^R + \hat{x}_2^R) + n_{R2} \quad (4.14)$$

olup kaynaklar mutlak doğrulukla bildikleri kendi işaretlerini çıkartırlarsa

$$y'_{R1} = h_{R1}\sqrt{P_R}(\hat{x}_2^R + (\hat{x}_1^R - x_1)) + n_{R1}, \quad (4.15)$$

$$y'_{R2} = h_{R2}\sqrt{P_R}(\hat{x}_1^R + (\hat{x}_2^R - x_2)) + n_{R2} \quad (4.16)$$

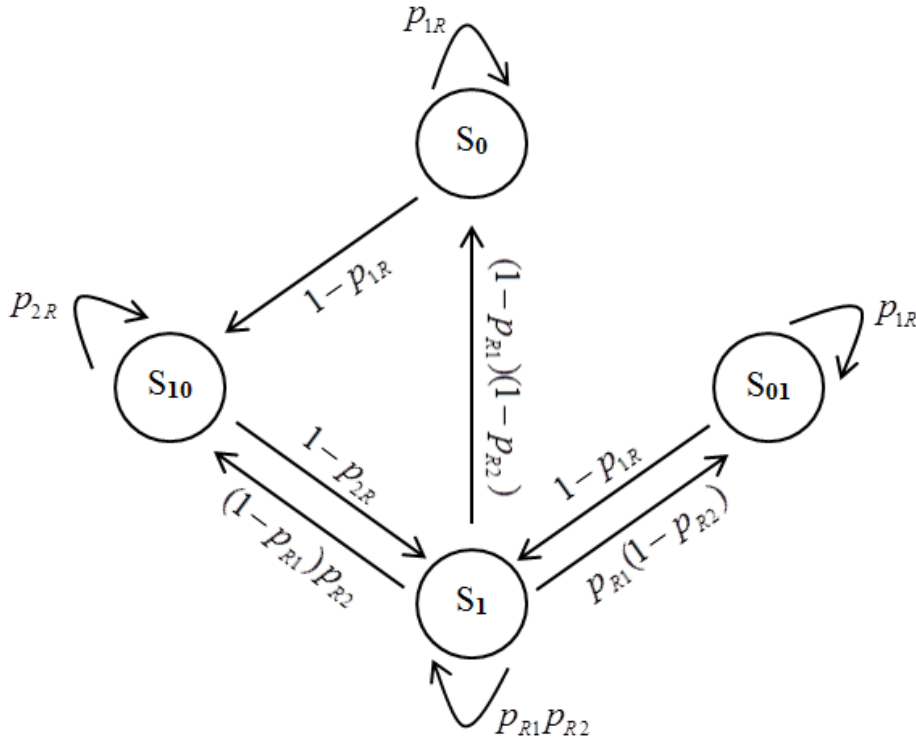
elde edilir. Burada  $T_1, T_2$ 'nin alıcı girişlerindeki toplamsal gürültü sırasıyla  $n_{R1}, n_{R2}$  ile gösterilmiştir. Her iki kaynak diğer kaynağın işaretinin kestirimini ML çözücü yardımıyla yapabilir.

#### 4.1.2 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği

Röle ve kaynaklarda ARQ kullanıldığı durumda bit iletim verimliliği kanal sığası üzerinden hesaplanabilmektedir. Şekil 4.2'de verilen Markov zincirine sahip iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir:

- $S_0$ : Başlangıç durumudur. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$ 'in işaretinin röle tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.

- $S_{10}$ : Röle tarafından  $T_1$ 'in bilgi işareti başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_2$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_2$ 'nin işaretinin röle tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_{01}$ : Röle tarafından  $T_2$ 'nin bilgi işareti başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$ 'in işaretinin röle tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_1$ : Röle tarafından hem  $T_1$ 'in hem de  $T_2$ 'nin bilgi işareti başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında röle iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; her iki kaynağın karşı uç birimin işaretini hatalı alması, yalnızca  $T_1$ 'in karşı uç birimin işaretini doğru alması, yalnızca  $T_2$ 'nin karşı uç birimin işaretini doğru alması ve her iki kaynağın karşı uç birimin işaretini hatalı alması olarak verilebilir.



**Şekil 4.2 :** Ayrık – zamanlı çöz ve aktar yöntemi için Markov zinciri.

Tüm bu bilgiler ve Shannon'ın kanal sığası formülü uyarınca Rayleigh sönümlmeli kanallarda her bir kanal için iletim hızı  $R$ 'nin kanalın iletim sığası olan  $R^{th}$ 'nin üzerinde kalması olasılıkları aşağıdaki gibi verilebilir [10]:

$$p_{1R} = 1 - e^{\frac{-(2^R-1)N_0}{P}}, \quad (4.17)$$

$$p_{2R} = 1 - e^{\frac{-(2^R-1)N_0}{P}}, \quad (4.18)$$

$$p_{R1} = 1 - e^{\frac{-(2^R-1)N_0}{P_R}}, \quad (4.19)$$

$$p_{R2} = 1 - e^{\frac{-(2^R-1)N_0}{P_R}}. \quad (4.20)$$

Şekil 4.2’de verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{01}$ ,  $S_{10}$  ve  $S_1$ ’de olma olasılıkları olan  $p(S_0)$ ,  $p(S_{10})$ ,  $p(S_{01})$  ve  $p(S_1)$  ise

$$p(S_0) = p(S_0)p_{1R} + p(S_1)(1-p_{R1})(1-p_{R2}), \quad (4.21)$$

$$p(S_{10}) = p(S_0)(1-p_{1R}) + p(S_{10})p_{R2} + p(S_1)(1-p_{R1})p_{R2}, \quad (4.22)$$

$$p(S_{01}) = p(S_{01})p_{1R} + p(S_1)(1-p_{R2})p_{R1}, \quad (4.23)$$

$$p(S_1) = p(S_{10})(1-p_{2R}) + p(S_{01})(1-p_{1R}) + p(S_1)p_{R1}p_{R2} \quad (4.24)$$

durum denklemlerinden hesaplanabilir. (4.21-4.24) ortak çözülürse

$$D = 3 - 2p_{1R} - 2p_{2R} - p_{R1} - p_{R2} + p_{1R}p_{R1} + p_{R1}p_{2R} + p_{R2}p_{2R} \quad (4.25)$$

olmak üzere sistemin her bir bellek durumunda bulunma olasılıkları

$$p(S_0) = \frac{(1-p_{2R})(1-p_{R1})(1-p_{R2})}{D}, \quad (4.26)$$

$$p(S_{10}) = \frac{(1-p_{1R})(1-p_{R1})}{D}, \quad (4.27)$$

$$p(S_{01}) = \frac{(1-p_{2R})p_{R1}(1-p_{R2})}{D}, \quad (4.28)$$

$$p(S_1) = \frac{(1-p_{1R})(1-p_{2R})}{D} \quad (4.29)$$

şeklinde verilebilir. Tüm bu bilgiler ışığında, bir çevrimlik iletişim sonunda tüm bellek durumlarının kaynaklara başarılı bir şekilde ilettikleri toplam bit sayısını ifade eden bit iletim verimliliği (4.7) kullanılarak

$$\eta = \frac{R(1-p_{1R})(1-p_{2R})(2-p_{R1}-p_{R2})}{D} \quad (4.30)$$

olarak hesaplanır.

Sistem sığası ise (4.10)'da gösterildiği üzere yüksek işaret – gürültü oranları için iletişim sisteminin sağlayabileceği en büyük iletim hızını ifade eder. Dolayısıyla Ayrık – Zamanlı DF sistemi için sistem sığasının, kanallardaki servis dışı kalma olasılıklarının sıfıra yakınsadığı durumda  $S_1$  bellek durumuna  $1/3$  olasılıkla geçileceği ve bu bellek durumunda kaynaklara  $2R$  hızında iletim yapılacağı için  $2R/3$  olduğu söylenebilir.

#### 4.1.3 Enerji verimliliği

Şekil 4.2'de verilen yapının dört durumlu bellek geçişlerine sahip olduğu görülmektedir. Sistemin enerji verimliliği en temel olarak bir çevrimlik iletişim sonunda harcanan toplam enerjinin iletilen toplam bilgi biti miktarına oranı olarak verilebilir. Buna göre (4.8)'deki ifade açılacak olursa ortalama enerji tüketimi

$$E_b = \frac{p(S_0)E(S_0) + p(S_{10})E(S_{10}) + p(S_{01})E(S_{01}) + p(S_1)E(S_1)}{\eta} \quad (4.31)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada  $E(S_i)$  her bir bellek durumunda harcanan ortalama enerji miktarını göstermekte olup (4.9) kullanılarak aşağıda belirtildiği gibi hesaplanabilir:

$$E(S_0) = \frac{P}{1-p_{1r}}, \quad (4.32)$$

$$E(S_{10}) = \frac{P}{1-p_{2r}}, \quad (4.33)$$

$$E(S_{01}) = \frac{P}{1 - p_{2r}}, \quad (4.34)$$

$$E(S_1) = \frac{2P_R}{1 - p_{r1}p_{r2}}. \quad (4.35)$$

## 4.2 Eş – Zamanlı Çöz ve Aktar Yöntemi

### 4.2.1 Sistem yapısı

Kaynak düğümlerin bilgi dizilerini aynı zaman aralığında ilettiği Şekil 4.1’de verilen iki yönlü sistem [11] için ilk iletim periyodu sonunda röle girişinde elde edilen  $y_R$  işareti

$$y_R = h_{1R}\sqrt{P}x_1 + h_{2R}\sqrt{P}x_2 + n_R \quad (4.36)$$

olarak verilebilir. İşaretleşme sonunda röle  $y_R$  uyarınca  $\hat{x}_1^R$  ve  $\hat{x}_2^R$  kestirimlerinde bulunabilir.

İkinci iletim aralığında ise röle iletim yapacaktır ve kaynak birimlerin girişlerinde elde edilen işaretler

$$y_{R1} = h_{R1}\sqrt{P_R}x_R + n_{R1}, \quad (4.37)$$

$$y_{R2} = h_{R2}\sqrt{P_R}x_R + n_{R2} \quad (4.38)$$

olup  $x_R$  röle biriminin  $\hat{x}_1^R$  ve  $\hat{x}_2^R$  kestirimleri yardımıyla [19]’daki gibi bir kodlama matrisi kullanarak elde ettiği işarettir.  $T_1$ ,  $T_2$ ’nin girişlerindeki toplamsal gürültü işaretleri de sırasıyla  $n_{R1}$ ,  $n_{R2}$  ile gösterilmiştir. Her iki kaynak elde ettikleri  $\hat{x}_R$  kestirimi ve kendi işaretleri  $x_1$ ,  $x_2$ ’yi kullanarak yine [19]’daki gibi bir kod çözme matrisi kullanarak diğer uç birimin işaretini sezebilirler.

### 4.2.2 Sistem sığısı ve bit iletim verimliliği

Röle ve kaynaklarda ARQ kullanıldığı durumda bit iletim verimliliği kanal sığısı üzerinden hesaplanabilmektedir. Şekil 4.3’te verilen Markov zincirine sahip iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir:

- $S_0$ : Başlangıç durumudur. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin işaretlerinin röle tarafından hatalı alınması,  $T_1$ 'in işaretinin doğru  $T_2$ 'nin işaretinin hatalı,  $T_1$ 'in işaretinin hatalı  $T_2$ 'nin işaretinin doğru alınması ve her iki uç birimin işaretlerinin doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_{10}$ : Röle tarafından  $T_1$ 'in bilgi işareti başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında röle  $T_1$ 'in bilgi işaretini  $T_2$ 'ye iletacaktır. Olası durumlar;  $T_2$ 'nin  $T_1$ 'in işaretini röle üzerinden hatalı veya doğru alması olarak verilebilir.
- $S_{01}$ : Röle tarafından  $T_2$ 'nin bilgi işareti başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında röle  $T_2$ 'nin bilgi işaretini  $T_1$ 'e iletacaktır. Olası durumlar;  $T_1$ 'in  $T_2$ 'nin işaretini röle üzerinden hatalı veya doğru alması olarak verilebilir.
- $S_1$ : Röle tarafından hem  $T_1$ 'in hem de  $T_2$ 'nin bilgi işareti başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında röle her iki kaynağa birden,  $x_R$ 'yi göndermek kaydıyla, iletim yapacaktır. Olası durumlar; her iki kaynağın karşı uç birimin işaretini hatalı alması, yalnızca  $T_1$ 'in karşı uç birimin işaretini doğru alması, yalnızca  $T_2$ 'nin karşı uç birimin işaretini doğru alması ve her iki kaynağın karşı uç birimin işaretini doğru alması olarak verilebilir.

Tüm bu bilgiler ve Shannon'ın kanal sığası formülü uyarınca Rayleigh sönümlmeli durumda birinci zaman aralığında  $h_{1R}$  ve  $h_{2R}$  kanalları için iletim hızları  $R$ 'nin kanalların iletim sığası olan  $R^{\text{th}}$ 'nin üzerinde kalması olasılıkları aşağıdaki gibi verilebilir [11]:

$$p_0 = 1 - \frac{1}{2^R} \exp\left(-\frac{(2^R - 1)\sigma_n^2}{P}\right) - \frac{1}{2^R} \exp\left(-\frac{(2^R - 1)\sigma_n^2}{P}\right) - \exp\left(-\frac{(2^{2R} - 1)\sigma_n^2}{P}\right), \quad (4.39)$$

$$p_{10} = \frac{1}{2^R} \left[ \exp\left(-\frac{(2^R - 1)\sigma_n^2}{P}\right) - \exp\left(-\frac{(2^{2R} - 1)\sigma_n^2}{P}\right) \right], \quad (4.40)$$

$$p_{01} = \frac{1}{2^R} \left[ \exp \left( -\frac{(2^R - 1)\sigma_n^2}{P} \right) - \exp \left( -\frac{(2^{2R} - 1)\sigma_n^2}{P} \right) \right], \quad (4.41)$$

$$p_1 = 1 - p_0 - p_{10} - p_{01}. \quad (4.42)$$

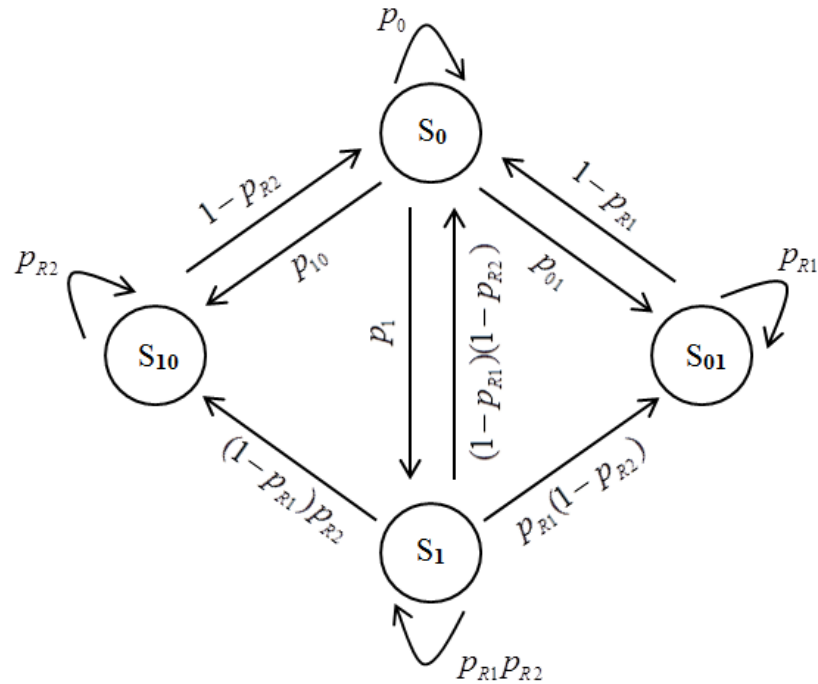
Burada  $p_0$  her iki kanal sığasının iletim hızının altında kalması,  $p_{01}$  yalnızca  $h_{2R}$  kanalının  $T_2$ -R arasındaki iletim hızının altında kalması,  $p_{01}$  yalnızca  $h_{1R}$  kanalının  $T_1$ -R arasındaki iletim hızının altında kalması,  $p_1$  ise her iki kanal sığasının iletim hızlarının üstünde olması olasılığını göstermektedir.

İkinci zaman aralığında rölenin iletimi neticesinde her iki kanal  $h_{R1}$ ,  $h_{R2}$ 'de iletim hızları  $R$ 'nin  $R^{th}$  kanalların sığasının üstünde kalma olasılıkları [11]'de gösterilediği üzere

$$p_{R1} = 1 - e^{-\frac{(2^R - 1)N_0}{P_R}}, \quad (4.43)$$

$$p_{R2} = 1 - e^{-\frac{(2^R - 1)N_0}{P_R}} \quad (4.44)$$

olarak verilir.



Şekil 4.3 : Eş – zamanlı çöz ve aktar yöntemi için Markov zinciri.

Şekil 4.3'te verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{01}$ ,  $S_{10}$  ve  $S_1$ 'de olma olasılıkları

$$p(S_0) = p(S_0)p_0 + p(S_{10})(1-p_{R2}) + p(S_{01})(1-p_{R1}) + p(S_1)(1-p_{R1})(1-p_{R2}), \quad (4.45)$$

$$p(S_{10}) = p(S_0)p_{10} + p(S_{10})p_{R2} + p(S_1)(1-p_{R1})p_{R2}, \quad (4.46)$$

$$p(S_{01}) = p(S_0)p_{01} + p(S_{01})p_{R1} + p(S_1)p_{R1}(1-p_{R2}), \quad (4.47)$$

$$p(S_1) = p_1p(S_0) + p_{R1}p_{R2}p(S_1) \quad (4.48)$$

şeklinde verilebilir.

(4.45-4.48) denklemleri çözülürse sistemin her bir bellek durumunda bulunma olasılıkları

$$p(S_0) = \left( \frac{p_{10}}{(1-p_{R2})} + \frac{(1-p_{R1})}{(1-p_{R2})} \frac{p_{R2}p_1}{1-p_{R1}p_{R2}} + \frac{p_{01}}{(1-p_{R1})} + \frac{(1-p_{R2})}{(1-p_{R1})} \frac{p_{R1}p_1}{1-p_{R1}p_{R2}} + \frac{p_1}{1-p_{R1}p_{R2}} + 1 \right)^{-1} \quad (4.49)$$

olmak üzere

$$p(S_{10}) = \left( \frac{p_{10}}{(1-p_{R2})} + \frac{(1-p_{R1})}{(1-p_{R2})} \frac{p_{R2}p_1}{1-p_{R1}p_{R2}} \right) p(S_0), \quad (4.50)$$

$$p(S_{01}) = \left( \frac{p_{01}}{(1-p_{R1})} + \frac{(1-p_{R2})}{(1-p_{R1})} \frac{p_{R1}p_1}{1-p_{R1}p_{R2}} \right) p(S_0), \quad (4.51)$$

$$p(S_1) = \frac{p_1}{1-p_{R1}p_{R2}} p(S_0) \quad (4.52)$$

olur. Tüm bu bilgilerin ışığında sistemin bit iletim verimliliği (4.7)'den hareketle

$$\eta = R[(2-p_{R1}-p_{R2})p(S_1) + (1-p_{R1})p(S_{10}) + (1-p_{R2})p(S_{01})] \quad (4.53)$$

olarak hesaplanır.

Sistem sığası ise (4.10)'dan yararlanarak  $R$  olarak belirtilebilir. Bu sonuç yeterince yüksek işaret – gürültü oranlarında ilk zaman aralığı sonunda rölenin her iki kaynağın işaretini başarılı bir şekilde alması ( $p(S_1) = 0.5$ ) ve kaynaklara  $2R$  hızıyla başarılı bir şekilde iletmesi neticesinde ( $p(S_1)2R = R$ ) elde edilir.

### 4.2.3 Enerji verimliliği

Şekil 4.3'te verilen dört durumlu bellek geçişlerine sahip yapının enerji verimliliği (4.31)'de gibi üzere olup her bir bellek durumunun enerji tüketimi (4.9)'a göre

$$E(S_0) = \frac{2P}{1 - p_0}, \quad (4.54)$$

$$E(S_{10}) = \frac{P_R}{1 - p_{R2}}, \quad (4.55)$$

$$E(S_{01}) = \frac{P_R}{1 - p_{R1}}, \quad (4.56)$$

$$E(S_1) = \frac{P_R}{1 - p_{R1}p_{R2}} \quad (4.57)$$

şeklinde alınır.

## 4.3 Eş – Zamanlı Kuvvetlendir ve Aktar Yöntemi

### 4.3.1 Sistem yapısı

[10]'da irdelenmiş olan kaynak düğümlerin bilgi dizilerini aynı zaman aralığında ilettiği ve rölede kuvvetlendir ve aktar tekniğinin kullanıldığı Şekil 4.1'de verilen iki yönlü sistem için ilk iletim periyodu sonunda röle girişinde elde edilen  $y_R$  işareti

$$y_R = h_{1R}\sqrt{P}x_1 + h_{2R}\sqrt{P}x_2 + n_R \quad (4.58)$$

olarak verilebilir. İkinci iletim periyodunda röle aldığı  $y_R$  işaretinin gücünü normalize ederek iletim yapacaktır. Böylece kaynak birimlerin girişlerinde elde edilen  $y_{R1}$  ve  $y_{R2}$  işaretleri

$$y_{R1} = h_{R1} \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{2P + \sigma_n^2}} y_R + n_{R1}, \quad (4.59)$$

$$y_{R2} = h_{R2} \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{2P + \sigma_n^2}} y_R + n_{R2} \quad (4.60)$$

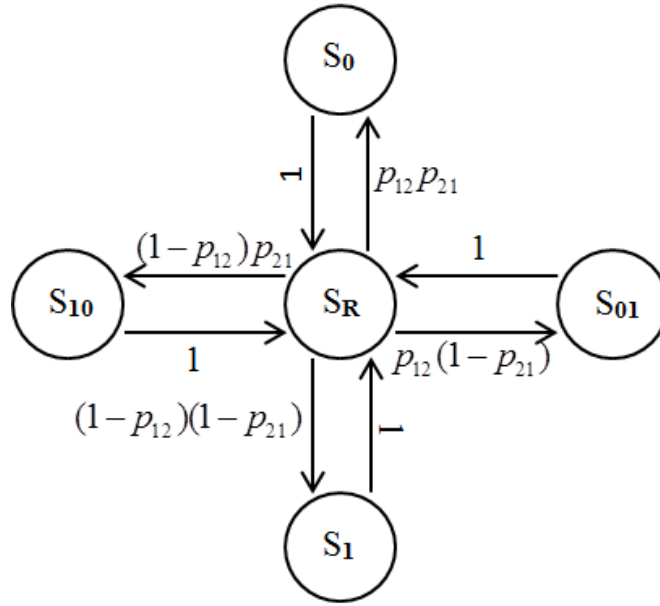
olup her iki uç birim röleden aldıkları işaretten kendi bilgi işaretlerini çıkararak diğer kaynağın işaretinin kestiriminde bulunabilirler.

#### 4.3.2 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği

Rölede kuvvetlendir ve aktar yönteminin tercih edildiği durumda ARQ'yu yalnızca uç birimlerde uygulamak mümkündür. Bu nedenle Şekil 4.4'te verilen Markov zinciri Şekil 4.2-4.3'ten yapısal farklılık göstermekte olup beş bellekli durumdadır. Bit iletim verimliliğini yine kanal sığası üzerinden hesaplamak mümkün olmakla beraber analizler  $T_1$ -R- $T_2$  ve  $T_2$ -R- $T_1$  kaskat kanalları için yapılacaktır. Kuvvetlendir ve aktar tekniği kullanılan ve Şekil 4.4'te Markov zinciri verilen iletişim sistemi için aşağıdaki kurallar geçerlidir:

- $S_0$ : Başlangıç ya da her iki kaynağın diğer kaynağın işaretini hatalı aldığı durumdur. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  işaretlerini (başlangıç durumu için ilk, hatalı işaretleşme sonucu oluşan durum için bir önceki zaman aralığında ilettikleri işaret dizilerini) birlikte iletecektir. İletim sonrası olası tek durum  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin işaretlerinin röle tarafından alınmasıdır.
- $S_{10}$ :  $T_2$  tarafından  $T_1$ 'in bilgi işaretinin başarılı,  $T_1$  tarafından  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin başarısız bir şekilde alındığı durumdur. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  yeni bilgi işaretini,  $T_2$  ise  $T_1$  tarafından hatalı alınan bilgi işaretini tekrar iletecektir. İletim sonrası olası tek durum  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin işaretlerinin röle tarafından alınmasıdır.
- $S_{01}$ :  $T_1$  tarafından  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin başarılı,  $T_2$  tarafından  $T_1$ 'in bilgi işaretinin başarısız bir şekilde alındığı durumdur. Sıradaki zaman aralığında  $T_2$  yeni bilgi işaretini,  $T_1$  ise  $T_2$  tarafından hatalı alınan bilgi işaretini tekrar iletecektir. İletim sonrası olası tek durum  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin işaretlerinin röle tarafından alınmasıdır.

- $S_1$ : Her iki kaynağın diğer kaynağın işaretini doğru aldığı durumdur. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  yeni bilgi işaretlerini birlikte iletecektir. İletim sonrası olası tek durum  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin işaretlerinin röle tarafından alınmasıdır.
- $S_R$ : Röle tarafından  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi işaretleri alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında röle almış olduğu bu işareti her iki kaynağa birden kuvvetlendirerek gönderir. İletim sonrası olası durumlar; her iki kaynağın karşı birimin işaretini hatalı alması, yalnızca  $T_1$ 'in  $T_2$ 'nin işaretini doğru alması, yalnızca  $T_2$ 'nin  $T_1$ 'in işaretini doğru alması ve her iki kaynağın karşı birimin işaretini doğru alması olarak verilebilir.



**Şekil 4.4 :** Eş – zamanlı kuvvetlendir ve aktar yöntemi için Markov zinciri.

Tüm bu bilgiler ve Shannon’ın kanal sığası formülü uyarınca Rayleigh sönümlemeli durumda ikinci işaretleşme aralığında  $h_{12}$  ve  $h_{21}$  kanal katsayıları için iletim hızları  $R$ ’nin kanalların iletim sığası olan  $R^{th}$  ’nin üzerinde kalması olasılıkları

$$\beta = \frac{\sqrt{P_R}}{\sqrt{2P + \sigma_n^2}} \quad (4.61)$$

olmak üzere [10]’a göre aşağıdaki gibi verilebilir:

$$p_{12} = 1 - \int_0^\infty e^{-\frac{(2^R - 1)\sigma_n^2(1 + \beta^2 z)}{P\beta^2 z}} dz, \quad (4.62)$$

$$p_{21} = 1 - \int_0^{\infty} e^{-\frac{(2^R-1)\sigma_n^2(1+\beta^2z)}{P\beta^2z}} dz. \quad (4.63)$$

Şekil 4.4'te verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{01}$ ,  $S_{10}$ ,  $S_1$  ve  $S_R$ 'de olma olasılıkları olan

$$p(S_0) = p(S_b)p_{12}p_{21}, \quad (4.64)$$

$$p(S_{10}) = p(S_b)p_{21}(1-p_{12}), \quad (4.65)$$

$$p(S_{01}) = p(S_b)p_{12}(1-p_{21}), \quad (4.66)$$

$$p(S_1) = p(S_b)(1-p_{12})(1-p_{21}), \quad (4.67)$$

$$p(S_R) = \frac{1}{2} \quad (4.68)$$

olur ve bit iletim verimliliği  $\eta$  ise (4.7)'ye göre

$$\eta = \frac{R(2-p_{12}-p_{21})}{2} \quad (4.69)$$

olarak hesaplanır.

Eş – Zamanlı AF sisteminin sığası Bölüm 4.2'de aktarılan Eş – Zamanlı DF sistemiyle benzer şekilde  $R$  olarak verilir.  $S_R$  bellek durumunun  $1/2$  olasılıklı olduğu Şekil 4.4'te verilen yapıda röle aktarımı sonrasında her iki kaynağın da diğer kaynağın işaretini doğru almaları sonucunda sistem sığası  $(1/2)2R = R$  olarak bulunur.

### 4.3.3 Enerji verimliliği

Şekil 4.4'te verilen beş durumlu bellek geçişlerine sahip yapının enerji verimliliği (4.8)'e göre:

$$E_b = \frac{p(S_0)E(S_0) + p(S_{10})E(S_{10}) + p(S_{01})E(S_{01}) + p(S_1)E(S_1) + p(S_R)E(S_R)}{\eta} \quad (4.70)$$

şeklinde olup (4.9) kullanılarak, Şekil 4.4'teki her bir bellek durumundaki enerji tüketimi

$$E(S_0) = E(S_{10}) = E(S_{01}) = E(S_1) = 2P, \quad (4.71)$$

$$E(S_R) = 2P_R \quad (4.72)$$

olarak verilir ve (4.69), (4.71-4.72) ışığında (4.70) açılacak olursa enerji verimliliği

$$E_b = \frac{2(P + P_R)}{(2 - p_{12} - p_{21})R} \quad (4.73)$$

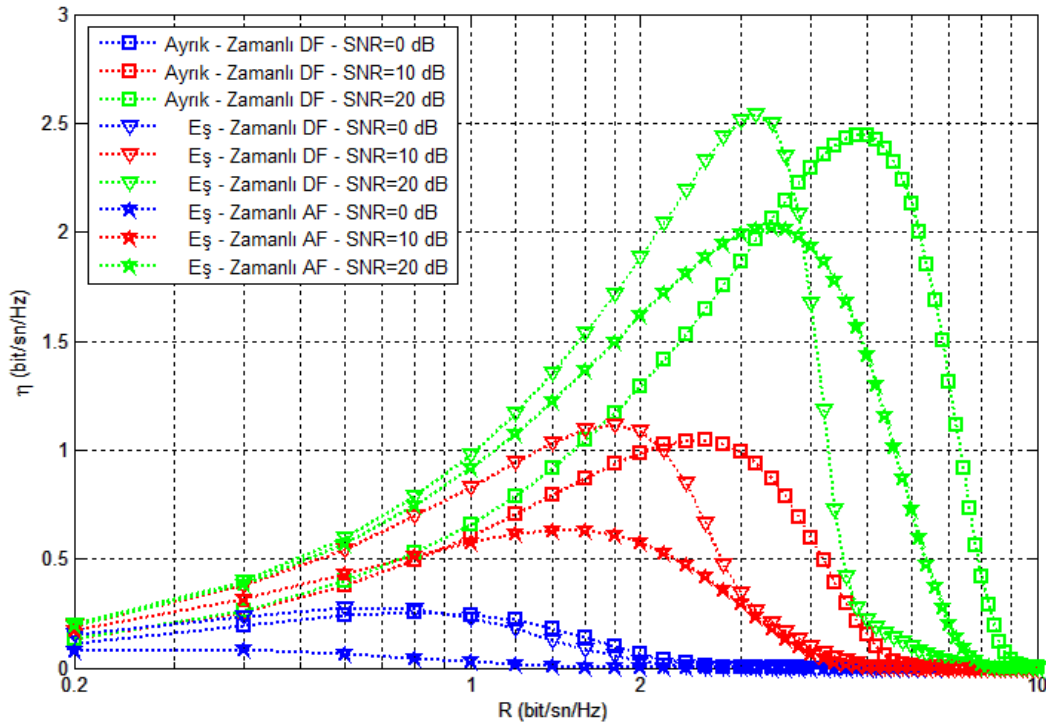
şeklinde hesaplanır.

#### 4.4 Benzetim Sonuçları

[10-11]'de verilen, Bölüm 4.1, 4.2 ve 4.3'te analiz edilen sistemlerin benzetim sonuçları hem kuramsal hesaplarla hem de Monte Carlo benzetim tekniğiyle elde edilmiş olup sonuçların birbiriyle örtüştüğü gözlemlenmiştir. [10] ve [11]'deki başarımlı ölçütlerinin farklı varsayımlar altında verilmiş olması nedeniyle mevcut yapılar üzerinde bir takım değişiklikler yapılmış, bu yolla adil bir karşılaştırma ortamı mümkün kılınmıştır. Bu varsayımlar Bölüm 4'ün son paragrafında verilmiş olup Bölüm 4.1, 4.2 ve 4.3'teki matematiksel çıkarımlar bu çerçevede yapılmıştır. Ek olarak röle iletim gücü  $P_R = P$  alındığı bilgisi göz önünde bulundurulmalıdır.

Şekil 4.5'te Ayırık – Zamanlı DF (çöz ve aktar), Eş – Zamanlı DF (çöz ve aktar) ve Eş – Zamanlı AF (kuvvetlendir ve aktar) tekniklerinin 0, 10, 20 dB'lik işaret – gürültü oranları (SNR) için iletim hızlarıyla bit iletim verimlilikleri arasındaki ilişki verilmiştir. Şekil 4.5'e göre sistemlerin en büyük bit iletim verimlilikleri arasında Eş – Zamanlı DF > Ayırık – Zamanlı DF > Eş – Zamanlı AF gibi bir ilişki vardır. Bu durumun oluşmasında eş – zamanlı iletim durumunda iki zaman aralığı sonunda  $2R$  gibi bir en büyük bit iletimine ulaşılabilirken ayırık – zamanlı iletim durumunda üç zaman aralığı sonunda  $2R$  düzeyinde en büyük bit iletimine ulaşılabilmesi etkindir. Aynı  $R$  için daha yüksek SNR değerlerinde eş – zamanlı ve ayırık – zamanlı DF sistemleri arasındaki bit iletim verimliliği farkının açılacağını öngörmek mümkündür. Öte yandan AF temelli sistemlerin düşük

$R$  ve işaret – gürültü oranlarındaki verimsizliği (rölede ARQ uygulanamaması, düşük SNR’larda kuvvetlendirilen gürültünün bozucu etkisinin daha belirgin olması ve çok küçük  $R$  değerlerinde servis dışı kalma olasılığına iletim hızından daha fazla etki etmesi- üstel olarak  $2^R$  ve  $\sigma_n^2$ ) bu tekniğin bit iletim verimliliğinin diğer iki sisteme nazaran daha alçak düzeyde kalmasına neden olmuştur. Şekil 4.5’te verilmemiş olsa da alıcı girişindeki yeterince yüksek SNR değerleri için (SNR>35 dB) Eş – Zamanlı AF sistemi, diğer iki sistemi başarımlı olarak geçebilmektedir [10].

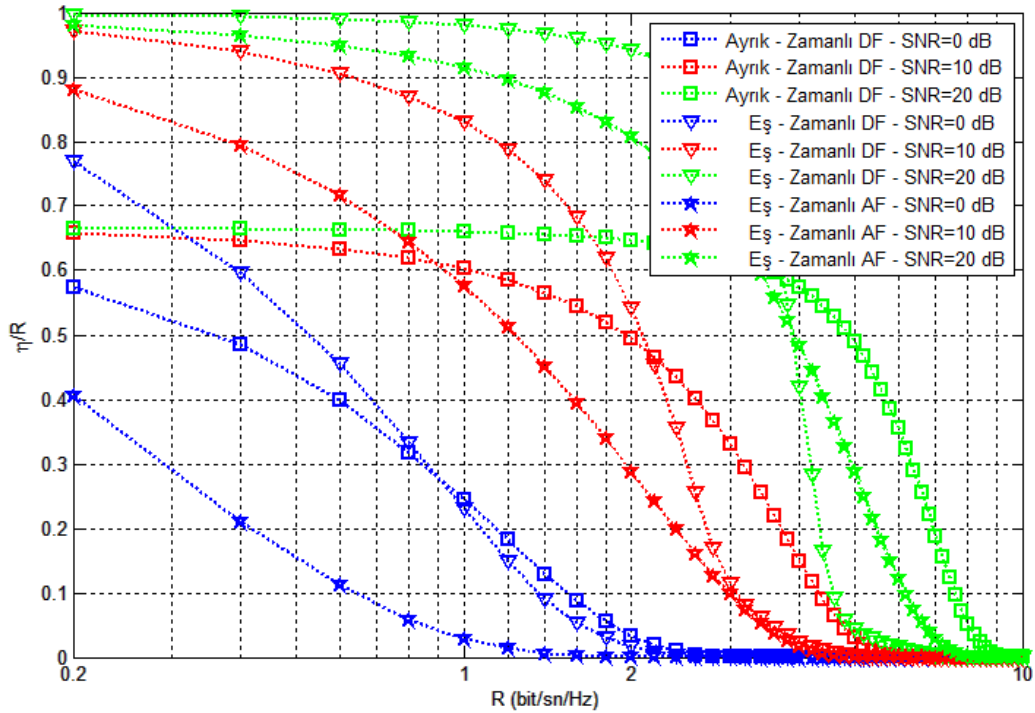


**Şekil 4.5 :** Farklı iletim hızlarında bit iletim verimliliği.

Şekil 4.5’ten çıkarılabilecek bir başka sonuç, yeterince yüksek ve aynı değerdeki SNR için artan  $R$  ile sistem performansındaki yıkım üzerinedir. Yukarıda belirttiğimiz Eş – Zamanlı DF > Ayrık – Zamanlı DF > Eş – Zamanlı AF ilişkisi söz konusu durumda geçerliliğini yitirmektedir. Örneğin SNR=25,  $R=4$  için bit iletim verimlilikleri arasında Ayrık – Zamanlı DF > Eş – Zamanlı AF > Eş – Zamanlı DF sıralamasından söz edilebilir. Görüldüğü üzere aynı SNR için  $R$  yeterince yüksekse Eş – Zamanlı DF’nin başarımında dramatik bir düşüş söz konusu olmaktadır. Çünkü Eş – Zamanlı DF sisteminde röle alıcı karmaşıklığı kaynak birimlerin  $M$  düzeyli modülasyon durumunda  $M^2$ ’dir ve bu karesellik artan  $R$  ( $R'$  rölenin bit iletim hızı olmak üzere;  $R'=2R$ ) ile röleye doğru olan iletimde iletim hızının kanal sığasının üstünde kalma olasılığını dramatik bir şekilde arttırmaktadır. Benzer şekilde

Eş – Zamanlı AF sisteminde röle biriminde kuvvetlendirilerek aktarılan gürültü bileşeni artan  $R$  ile uç birim başarımını etkilemekte ve Ayrık – Zamanlı DF sistemine göre erken yıkıma uğramasına neden olmaktadır.

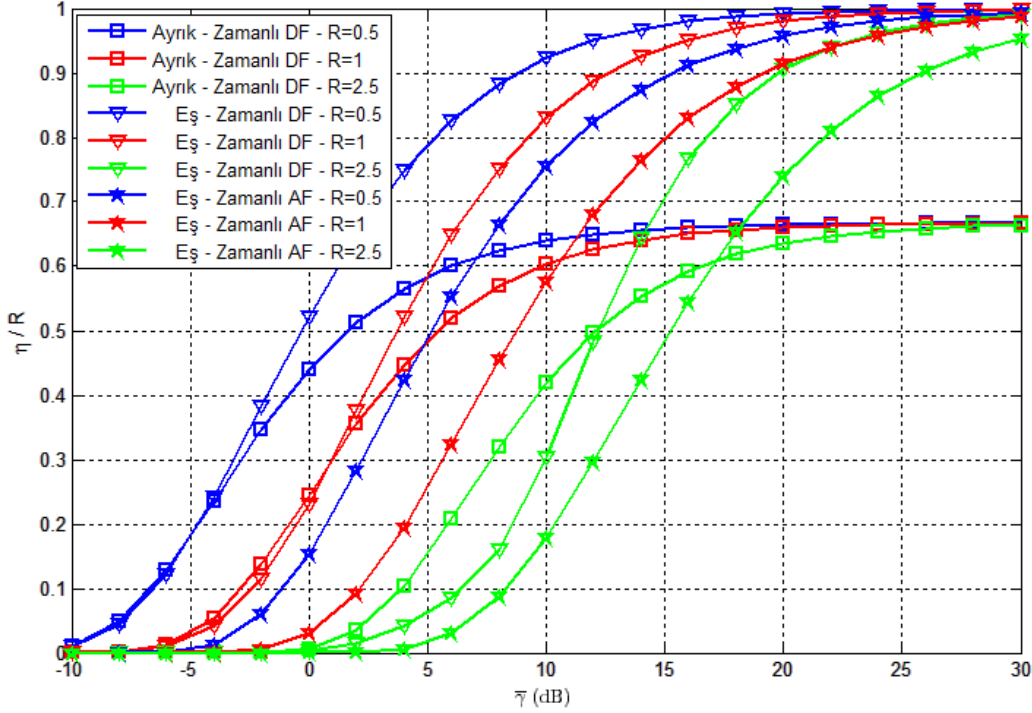
Şekil 4.6’da üç sistemin yine 0, 10, 20 dB’lık SNR değerleri için iletim hızlarıyla normalize bit iletim verimlilikleri arasındaki ilişki verilmiştir. Görüldüğü üzere yeterince büyük SNR değerleri için Eş – Zamanlı DF ve Eş – Zamanlı AF sistemleri en büyük bit iletim verimlilikleri olan 1’e ulaşabilmektedirler. Ayrık – Zamanlı DF sistemi de  $0, \bar{6}$  olan en büyük iletim verimliliğine ulaşabilmektedir. Şekil 4.6’dan çıkarılabilecek ikinci bir sonuç ise Şekil 4.5 üzerinden de vurgulanan sistemlerin yıkıma uğrama eşikleridir. Yeterince yüksek, aynı değerdeki SNR için sığanın ilk olarak Eş – Zamanlı DF, en son ise Ayrık – Zamanlı DF sisteminde sönmüldüğü görülmektedir. SNR = 0 dB için Eş – Zamanlı AF sisteminin bit iletim verimliliği, Eş – Zamanlı DF’ye göre daha çabuk sıfırlanmaktadır. Bu durumun oluşmasında düşük SNR’larda AF’nin kötü başarımının baskınlığından söz edilebilir.



Şekil 4.6 : Farklı iletim hızlarında normalize bit iletim verimliliği.

Her üç sistemin  $R=0.5, 1, 2.5$  bit/sn/Hz’lik iletim hızları için artan SNR değerleriyle normalize bit iletim verimlilikleri arasındaki ilişki ise Şekil 4.7’de verilmiştir. Sistemlerin yeterince büyük SNR değerlerinde sistem için mümkün en büyük bit iletim verimliliklerine ( $1-1-2/3$ ) ulaştıkları; artan  $R$  ile en büyük bit iletim

verimliliğine ulaşılan SNR değerinin yükseldiği görülmektedir. Ayrıca Ayrık – Zamanlı DF sisteminin, Eş – Zamanlı DF ve AF sistemlerine göre daha düşük SNR değerlerinde en büyük bit iletim verimliliğine ulaştığı da Şekil 4.5'ten görülmektedir. Bu sonucun ortaya çıkmasının nedeni, kaynaklar farklı zaman aralıklarında iletim yaptığı için kaynak – röle iletim aralığında Ayrık – Zamanlı DF sisteminin servis dışı kalma olasılığının daha düşük olmasıdır.

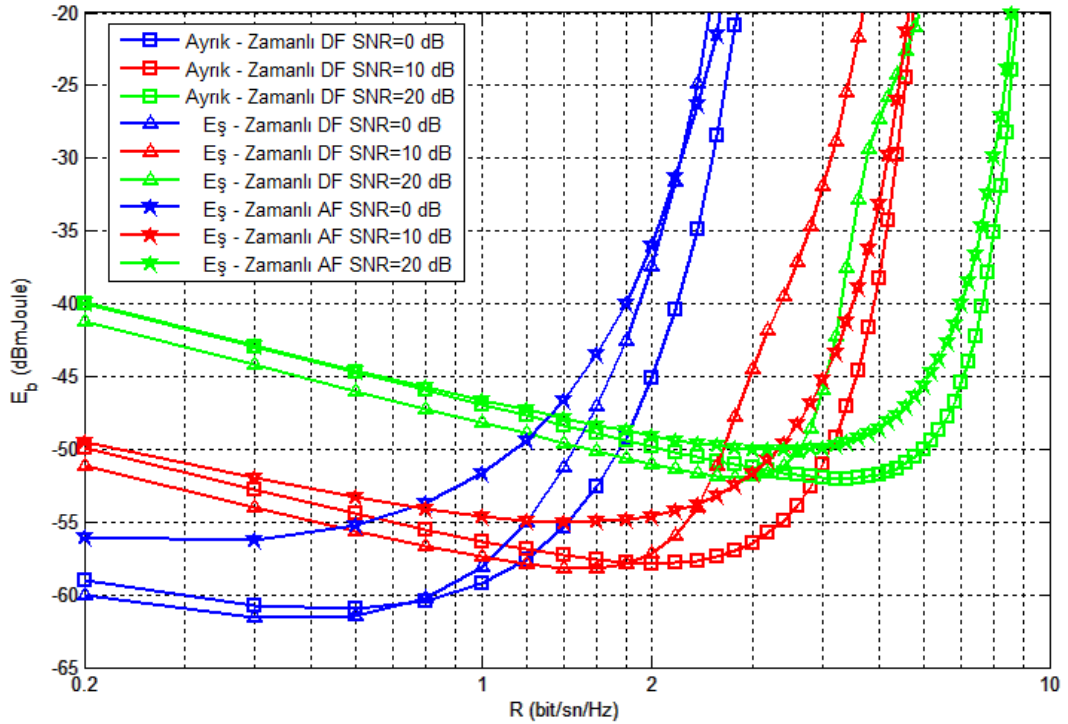


**Şekil 4.7 :** Farklı işaret - gürültü oranlarında normalize bit iletim verimliliği.

Son olarak sistemlerin iletim hızlarıyla enerji verimlilikleri arasındaki ilişki irdelenmiştir. Şekil 4.8'den görüleceği üzere her üç sistem için de yeterince küçük  $R$  değerlerinde SNR'ın düşük olduğu durumlar daha verimlidir. Çünkü iletim hızı  $R$  için en büyük bit iletim verimliliğine düşük SNR için de yüksek SNR için de ulaşılmıştır ve yüksek SNR'da iletim gücü  $P$  gereksinim duyulanın üzerindedir. Bu yüzden daha verimsizdir. Aksine  $R$  arttıkça, iletim hızının kanal sığasının altında kalabilmesi için daha yüksek iletim gücüne ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek iletim gücü sağlanmadığı, SNR'ın düşük olduğu hallerde ARQ'lu sistemlerde düğümlerde yapılacak iletim tekrarları armakta ve enerji verimliliği düşmektedir.

İncelenen üç sistemi enerji verimliliği açısından karşılaştıracak olursak; Eş – Zamanlı DF'nin en verimsiz, Ayrık – Zamanlı DF ve Eş – Zamanlı AF'nin benzer enerji verimliliğinde olmakla birlikte Ayrık – Zamanlı DF başarımının çok az

daha iyi olduğu görülmektedir. Enerji verimliliğindeki başarımlar iki açıdan irdelenebilir: artan  $R$  ve yeterince düşük  $R$  değerleri için üç sistemin başarımlarının karşılaştırılması.



**Şekil 4.8 :** Farklı iletim hızlarında enerji verimliliği.

Artan  $R$  ile birlikte Eş – Zamanlı DF sistemin her bir bit iletimi için ihtiyaç duyduğu dramatik enerji artışının daha erken gözlenmesi Şekil 4.5, 4.6 ve 4.7’de görülen yüksek iletim hızı değerlerindeki düşük (sıfıra yakınsayan) bit iletim verimliliğinden ileri gelmektedir. Bit iletim verimliliğinin diğer iki sisteme göre daha erken düşmesinin nedeni olan kaynaklardan röleye doğru yapılan  $2R$  (Ayrık – Zamanlı DF sisteminde  $R$ , Eş – Zamanlı AF sisteminde röle çözme yapmadığı için doğrudan kaynağa doğru  $R$ ) hızlı iletimin kanal sığasının üstünde kalması olasılığının artması neticesinde gerçekleştirilen iletim tekrarları enerji verimliliğini de kötü yönde etkilemektedir.

Yeterince düşük  $R$  değerleri için Eş – Zamanlı AF sistemin daha verimsiz olması ise yine bu iletim hızlarındaki düşük bit iletim verimliliğiyle ilgilidir. Üç sistem içerisinde Ayrık – Zamanlı DF ve Ayrık – Zamanlı AF her üç düğümde ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $R$ ) de aynı güçle iletim yaparken ( $P$ ,  $P$ ,  $2P_r$ ), Eş – Zamanlı DF sistemi kaynaklarda yine aynı fakat rölede yarı güçle iletim yapar ( $P$ ,  $P$ ,  $P_r$ ). Bunun sonucunda da her üç sistemin en büyük normalize bit iletim verimliliklerini sağladığı SNR- $R$  çiftleri

için enerji verimliliği en yüksek sistem Eş – Zamanlı DF'dir. Artan hızla birlikte rölenin  $2R$  hızlı aldığı kaynak işaretlerine bağlı olarak Eş – Zamanlı DF'nin bit iletim verimliliği, dolayısıyla da enerji verimliliği daha çabuk kötüleşmektedir. Eş – Zamanlı AF ve Ayrık – Zamanlı DF her bir düğümde aynı güçte iletim yaptığı için enerji verimlilikleri arasındaki başarımların farkı doğrudan bit iletim verimlilikleri arasındaki farkla ilişkilidir. Öte yandan Ayrık – Zamanlı DF sisteminde üçüncü zaman aralığında rölenin  $2R$  hızıyla ve toplam  $2P_R$  gücüyle iletim yapması sonucunda servis kesintisi olasılığı birinci ve ikinci zaman aralığında  $P$  gücüyle iletim yapan  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin servis kesintisi yaşama olasılığından farklı değildir, çünkü röle  $2R$  hızında iletim yapıyor olsa da her bir kaynak düğümü kendi bilgi işaretini almış olduğu işareten çıkarmaktadır. Benzer bir yorum rölede çözme işlemi yapılmadığı ve gürültünün kuvvetlendirilerek hedef birimlere aktarıldığı bilgisi göz önünde bulundurularak Eş – Zamanlı AF sistemi için de tekrarlanabilir.

Son bir vurgu Ayrık – Zamanlı DF sistemin röle güç tüketimine ilişkin yapılabilir. [10]'da irdelenen yapıda rölenin iletimi  $P_R(x_1 + x_2)$  şeklinde düşünülmüş ve bu durumda rölenin güç sarfıyatı  $2P_R$  şeklinde gerçekleşmiştir. Bunun yerine ağ kodlaması kullanılması durumunda röle iletimi  $P_R x_R$  ( $x_R = x_1 \oplus x_2$  olmak üzere) şeklinde yapılabilir ve bu yolla röle iletim gücü bit iletim verimliliğinden ödün vermeksizin 3 dB düşürülmüş olur. Sonuç olarak da sistemin enerji verimliliğinde bir miktar (3 dB'den daha az) iyileşme gözlemlenir.

## 5. ORTAK HEDEFLİ SİSTEMLER VE İLETİM SIĞASI

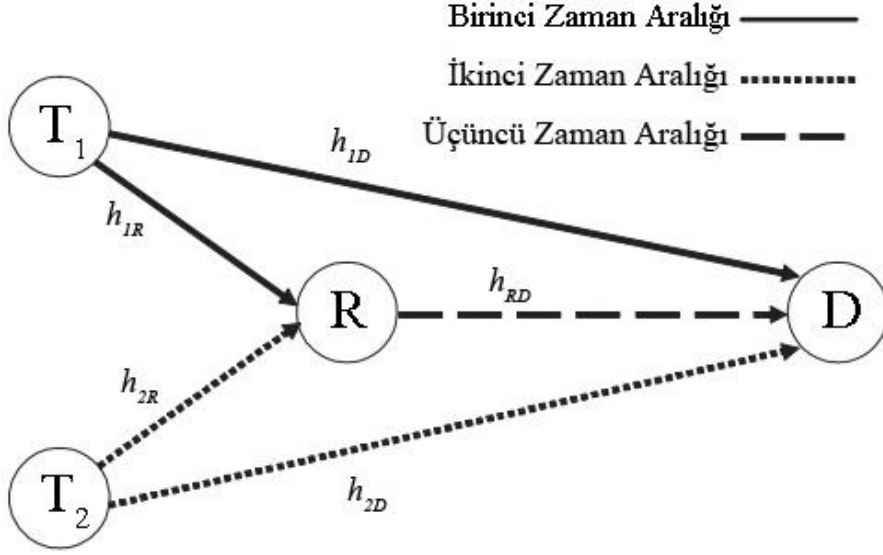
Bu bölümde önerilen protokoller ve yapılan çıkarımlar en temelde Şekil 5.1 ve 5.4'te sırasıyla ayrık – zamanlı ve eş – zamanlı iletim için verilen kaynak düğümlerin ortak bir hedefi paylaştığı iletişim modeli için geçerlidir. Çalışma,  $T_1$  ve  $T_2$  uç birimlerinin zaman kaynağını paylaşmaması (ayrık – zamanlı aktarım) ve paylaşması (eş – zamanlı aktarım) şeklinde iki farklı varsayıma dayandırılmıştır. Protokoller temelde bu iki yaklaşım altında geliştirilmiş olup; birinci grup protokoller (Protokol – 1, Protokol – 3, Protokol – 5) sistem kaynaklarının her iki uç birimce adil bir şekilde kullanılması ve yüksek güvenilirlik esasına dayanırken ikinci grup protokoller (Protokol – 2, Protokol – 4, Protokol – 6) sistem hızını en yüksek düzeyde tutmaya odaklıdır. Protokoller geliştirilirken sahip olunan motivasyon noktaları ve karşılaştırmaları Bölüm 5.1 ve Bölüm 5.2'deki teknik analizleri sonrasında ayrıntılı olarak verilecektir.

Önerilen protokoller için hesaplama, çıkarım ve başarımlar analizleri hata olasılığı üzerinden yapılmayacak olmasına karşın sistem yapılarını daha iyi anlayabilmek adına her bir zaman aralığında düğümlerde elde edilen işaretler matematiksel olarak ifade edilmiştir.

### 5.1 Ayrık – Zamanlı İletişim

Bölüm 4'te tanımlanan, iletim hızı ve kanal sığası arasındaki ilişki üzerinden verilen servis dışı kalma olasılığına dayalı sistem başarımlar yaklaşımı Şekil 5.1'deki yapı için incelenebilir.

Kısaca açıklanacak olursa; Şekil 5.1'de verilen sistemde  $T_1$  ve  $T_2$  kaynakları hedef ile röle üzerinden ve doğrudan iletişim sağlamaktadır. Birinci kaynak birimi olan  $T_1$  ile röle birimi R arasındaki kanal sönümlenme katsayısı  $h_{1R}$ , ikinci kaynak birimi olan  $T_2$  ile R arasındaki kanal  $h_{2R}$  ile gösterilmiştir. Benzer şekilde  $T_1$  ile hedef birimi D arasındaki kanal sönümlenme katsayısı  $h_{1D}$ ,  $T_2$  ile D arasındaki  $h_{2D}$  ve R ile D arasındaki ise  $h_{RD}$  ile gösterilmiştir.



**Şekil 5.1 :** Ayırık – zamanlı iletişim sistem yapısı.

Verilen sistem yapısı için iki farklı protokol önerilmiş olup bunlardan ilki [10-11]'de iki yönlü röleli ağlar için verilmiş olan protokollerden türetilmiştir. Bölüm 5.1.2'de verilen bu sistem için bilginin güvenilirliği ve kaynak uç birimlerin adil servis alması ön plandayken, Bölüm 5.1.3'te verilen diğer sistem uyarlamalı bir yapıda olup iletim hızını en yüksek düzeyde tutmaya odaklıdır. Her iki protokol de röle ve hedefte ARQ uygulanması temeline dayanmakta olup ARQ'yla ilgili ayrıntılı bilgiye EK A'dan ulaşılabilir.

### 5.1.1 Sistem yapısı

[20]'de irdelenmiş olan ve kaynak düğümlerin bilgi dizilerini farklı zaman aralıklarında ilettiği Şekil 5.1'de verilen sistem için  $P_1$   $T_1$  uç biriminin,  $P_2$   $T_2$  uç biriminin ve  $P_R$  rölenin iletim güçlerini göstermektedir. İlk iletim periyodunda  $T_1$ 'in, ikinci iletim periyodunda  $T_2$ 'nin ve üçüncü iletim periyodunda rölenin aktarım yaptığı sistem için ilk iletim aralığı sonunda röle ve hedef alıcı girişlerinde elde edilen  $y_{1R}$  ve  $y_{1D}$  işaretleri

$$y_{1R} = h_{1R}\sqrt{P_1}x_1 + n_{1R}, \quad (5.1)$$

$$y_{1D} = h_{1D}\sqrt{P_1}x_1 + n_{1D} \quad (5.2)$$

olarak verilebilir. Burada  $n_{1R}$  röle,  $n_{1D}$  hedef alıcı girişindeki toplamsal gürültüyü göstermektedir. İşaretleşme sonunda röle  $y_{1R}$  yardımıyla  $\hat{x}_1^R$  kestiriminde

bulunabilir. İkinci işaretleşme aralığında diğer kaynak düğümün iletimi sonucunda röle ve hedef alıcı girişlerinde oluşan  $y_{2R}$  ve  $y_{2D}$  işaretleri

$$y_{2R} = h_{2R}\sqrt{P_2}x_2 + n_{2R}, \quad (5.3)$$

$$y_{2D} = h_{2D}\sqrt{P_2}x_2 + n_{2D} \quad (5.4)$$

olarak verilebilir. Benzer şekilde  $n_{2R}$  röle,  $n_{2D}$  hedef alıcı girişlerindeki toplamsal gürültüyü göstermektedir. İşaretleşme sonunda röle  $y_{2R}$  yardımıyla  $\hat{x}_2^R$  kestiriminde bulunabilir.

Üçüncü işaretleşme aralığında ise röle iletim yapacaktır ve hedef birimin alıcı girişinde oluşan  $y_{RD}$  işareti

$$y_{RD} = h_{RD}\sqrt{P_R}(\theta_1\hat{x}_1 + \theta_2\hat{x}_2) + n_{RD} \quad (5.5)$$

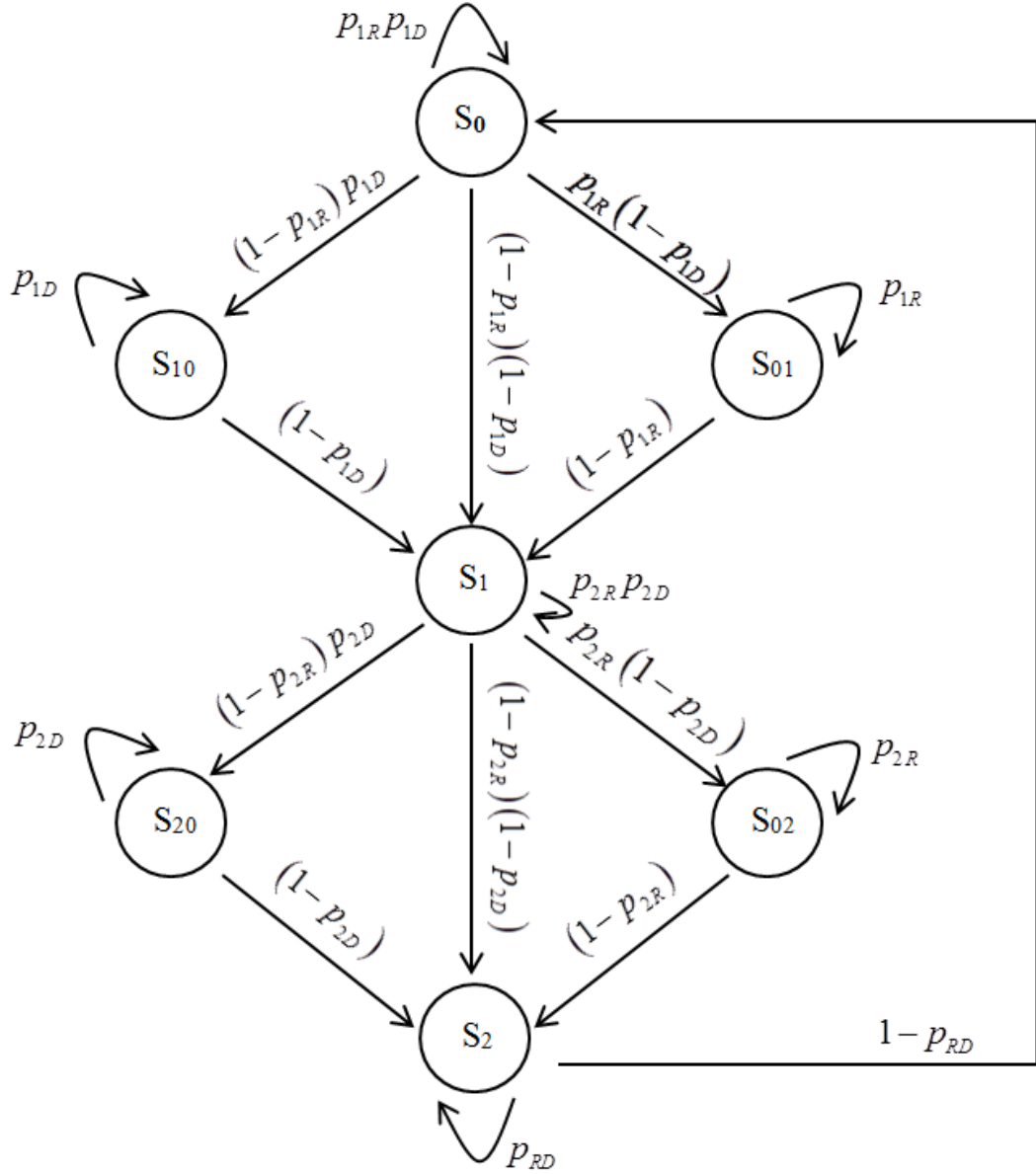
olup  $n_{RD}$  hedef alıcı girişindeki toplamsal gürültüyü göstermektedir. Üç zaman aralığı boyunca yapılan işaretleşme sonunda hedef, her iki kaynak birimin işaretini ortak bir ML çözücü yardımıyla kestirebilir.

Bölüm 5.1 boyunca verilen kanal dağılımları  $h_{1R} \sim CN(0, \sigma_{1R}^2)$ ,  $h_{2R} \sim CN(0, \sigma_{2R}^2)$ ,  $h_{1D} \sim CN(0, \sigma_{1D}^2)$ ,  $h_{2D} \sim CN(0, \sigma_{2D}^2)$  ve  $h_{RD} \sim CN(0, \sigma_{RD}^2)$  olarak alınmıştır. Ayrıca birinci ve ikinci zaman aralığı sonunda röle ve hedef alıcı girişi, üçüncü zaman aralığı sonunda hedef alıcı girişinde elde edilen  $n_{1R}$ ,  $n_{1D}$ ,  $n_{2R}$ ,  $n_{2D}$  ve  $n_{RD}$  gürültüleri sırasıyla  $n_{1R} \sim CN(0, \sigma_{n_{1R}}^2)$ ,  $n_{1D} \sim CN(0, \sigma_{n_{1D}}^2)$ ,  $n_{2R} \sim CN(0, \sigma_{n_{2R}}^2)$ ,  $n_{2D} \sim CN(0, \sigma_{n_{2D}}^2)$  ve  $n_{RD} \sim CN(0, \sigma_{n_{RD}}^2)$  dağılımlarıyla hesaplamalarda kullanılmıştır.

### 5.1.2 Protokol – 1

Ayrık – zamanlı iletişimde, röle ve hedefte geri besleme (ARQ) kullanıldığı durum için tasarlanan Protokol – 1’de temel amaç hedef birime  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının bilgi işaretlerini hem doğrudan hem de röle üzerinden başarılı bir şekilde aktarmaktır. Bit iletim verimliliğinin kanal sığası üzerinden hesaplanabileceği bu sistem için Şekil 5.2’de verilen Markov zinciri uyarınca aşağıdaki kurallar geçerlidir:

- $S_0$ : Başlangıç durumudur ya da  $T_1$ 'in işareti hem röle hem de hedef tarafından hatalı alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$ 'in işaretinin röle ve hedef tarafından hatalı, röle tarafından doğru hedef tarafından hatalı, röle tarafından hatalı hedef tarafından doğru veya röle ve hedef tarafından doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_{10}$ :  $T_1$ 'in bilgi işareti röle tarafından başarılı, hedef tarafından hatalı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  tekrar iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$ 'in işaretinin hedef tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_{01}$ :  $T_1$ 'in bilgi işareti röle tarafından hatalı, hedef tarafından başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  tekrar iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$ 'in işaretinin röle tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_1$ :  $T_1$ 'in bilgi işareti röle ve hedef tarafından başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_2$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_2$ 'nin işaretinin röle ve hedef tarafından hatalı, röle tarafından doğru hedef tarafından hatalı, röle tarafından hatalı, hedef tarafından doğru veya röle ve hedef tarafından doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_{20}$ :  $T_2$ 'nin bilgi işareti röle tarafından başarılı, hedef tarafından hatalı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_2$  tekrar iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_2$ 'nin işaretinin hedef tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_{02}$ :  $T_2$ 'nin bilgi işareti röle tarafından hatalı, hedef tarafından başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_2$  tekrar iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_2$ 'nin işaretinin röle tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_2$ :  $T_2$ 'nin bilgi işareti röle ve hedef tarafından başarılı bir şekilde alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında röle iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; rölenin gönderdiği  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi dizisini içeren işaretin hedef tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.



**Şekil 5.2 :** Protokol – 1 için Markov zinciri.

Şekil 5.2’de  $i$  ve  $j$  1 ( $T_1$ ), 2 ( $T_2$ ), R veya D olmak üzere  $p_{ij}$ ,  $h_{ij}$  kanalındaki işaretleşme sonucu servis dışı kalma olasılığını göstermektedir.

#### 5.1.2.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği

Tüm bu bilgiler ve Shannon’ın kanal sığası formülü uyarınca Rayleigh sönümlmeli kanallarda Şekil 5.1’de görülen iletişim sistemindeki her bir kanal için iletim hızı  $R$ ’nin kanalın iletim sığası olan  $R^{th}$ ’nin üzerinde kalması olasılıkları aşağıdaki gibi verilebilir:

$$p_{1R} = 1 - e^{\frac{-(2^{R_1}-1)\sigma_{n_{1R}}^2}{\sigma_{1R}^2 P_1}}, \quad (5.6)$$

$$p_{2R} = 1 - e^{\frac{-(2^{R_2}-1)\sigma_{n_{2R}}^2}{\sigma_{2R}^2 P_2}}, \quad (5.7)$$

$$p_{1D} = 1 - e^{\frac{-(2^{R_1}-1)\sigma_{n_{1D}}^2}{\sigma_{1D}^2 P_1}}, \quad (5.8)$$

$$p_{2D} = 1 - e^{\frac{-(2^{R_2}-1)\sigma_{n_{2D}}^2}{\sigma_{2D}^2 P_2}}, \quad (5.9)$$

$$p_{RD} = 1 - e^{\frac{-(2^{R_1+R_2}-1)\sigma_{n_{RD}}^2}{\sigma_{RD}^2 2P_R}}. \quad (5.10)$$

(5.6-5.10)'un ayrıntılı matematiksel çıkarımları EK B'de verilmiştir. Şekil 5.2'de verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{01}$ ,  $S_1$ ,  $S_{20}$ ,  $S_{02}$  ve  $S_2$ 'de olma olasılıkları olan  $p(S_0)$ ,  $p(S_{10})$ ,  $p(S_{01})$ ,  $p(S_1)$ ,  $p(S_{20})$ ,  $p(S_{02})$  ve  $p(S_2)$  ise

$$p(S_0) = p(S_0)p_{1R}p_{1D} + p(S_2)(1 - p_{RD}), \quad (5.11)$$

$$p(S_{10}) = p(S_0)(1 - p_{1R})p_{1D} + p(S_{10})p_{1D}, \quad (5.12)$$

$$p(S_{01}) = p(S_0)p_{1R}(1 - p_{1D}) + p(S_{01})p_{1R}, \quad (5.13)$$

$$p(S_1) = p(S_0)(1 - p_{1R})(1 - p_{1D}) + p(S_{10})(1 - p_{1D}) + p(S_{01})(1 - p_{1R}) + p(S_1)p_{2R}p_{2D}, \quad (5.14)$$

$$p(S_{20}) = p(S_1)(1 - p_{2R})p_{2D} + p(S_{20})p_{2D}, \quad (5.15)$$

$$p(S_{02}) = p(S_1)p_{2R}(1 - p_{2D}) + p(S_{02})p_{2R}, \quad (5.16)$$

$$p(S_2) = p(S_1)(1 - p_{2R})(1 - p_{2D}) + p(S_{20})(1 - p_{2D}) + p(S_{02})(1 - p_{2R}) + p(S_2)p_{RD} \quad (5.17)$$

şeklinde verilebilir. (5.11-5.17) çözüldürse sistemin her bir bellek durumunda bulunma olasılıkları  $p(S_0)$  cinsinden

$$p(S_{10}) = \frac{(1-p_{1R})p_{1D}}{(1-p_{1D})} p(S_0), \quad (5.18)$$

$$p(S_{01}) = \frac{(1-p_{1D})p_{1R}}{(1-p_{1R})} p(S_0), \quad (5.19)$$

$$p(S_1) = \frac{(1-p_{1R}p_{1D})}{(1-p_{2R}p_{2D})} p(S_0), \quad (5.20)$$

$$p(S_{20}) = \frac{(1-p_{1R}p_{1D})}{(1-p_{2R}p_{2D})} \frac{(1-p_{2R})p_{2D}}{(1-p_{2D})} p(S_0), \quad (5.21)$$

$$p(S_{02}) = \frac{(1-p_{1R}p_{1D})}{(1-p_{2R}p_{2D})} \frac{p_{2R}(1-p_{2D})}{(1-p_{2R})} p(S_0), \quad (5.22)$$

$$p(S_2) = \frac{(1-p_{1R}p_{1D})}{(1-p_{RD})} p(S_0) \quad (5.23)$$

olup sistemin bu bellek durumlarından herhangi birinde bulunması gerektiği yani

$$p(S_0) + p(S_{10}) + p(S_{01}) + p(S_1) + p(S_{20}) + p(S_{02}) + p(S_2) = 1 \quad (5.24)$$

koşulu altında her bir bellek durumunun ortaya çıkma olasılıkları tek tek hesaplanabilir. Sonuç olarak (4.7) kullanılarak sistemin bit iletim verimliliği

$$\eta = \frac{1}{2} \left[ \begin{aligned} &R_1 p(S_0) p_{1R} (1-p_{1D}) + R_1 p(S_0) (1-p_{1R}) (1-p_{1D}) + R_1 p(S_{10}) (1-p_{1D}) \\ &+ R_2 p(S_1) p_{2R} (1-p_{2D}) + R_2 p(S_1) (1-p_{2R}) (1-p_{2D}) \\ &+ R_2 p(S_{20}) (1-p_{2D}) + (R_1 + R_2) p(S_2) (1-p_{RD}) \end{aligned} \right] \quad (5.25)$$

şeklinde gösterilebilir. (5.25)'te gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\eta = \frac{1}{2} \left[ \begin{aligned} &R_1 (p(S_0) + p(S_{10})) (1-p_{1D}) + R_2 (p(S_1) + p(S_{20})) (1-p_{2D}) \\ &+ (R_1 + R_2) p(S_2) (1-p_{RD}) \end{aligned} \right] \quad (5.26)$$

elde edilir. (5.26)'ya ilişkin dikkat edilmesi gereken nokta kaynak birimlerin her işaretinin eş kopyaları hem T<sub>1</sub>-D, T<sub>2</sub>-D hem de R-D hattı üzerinden hedefe aktarıldığı için elde edilen bit iletim verimliliğinin 0.5 ile ağırlıklandırıldığıdır.

Sistem sığası (4.10)'da verildiği üzere iletişim sisteminin birim zamanda hedef birime aktarabileceği en büyük bilgi biti miktarıdır. Dolayısıyla Protokol – 1 için yeterince büyük SNR’larda kanallar üzerindeki servis kesilme olasılığının sıfıra yakınsadığı varsayımı altında kaynakların iletim yapacağı iki zaman aralığı boyunca ve rölenin kullanacağı bir zaman aralığı sonunda  $R_1 + R_2$  kadar bilgi bitini aktarmak mümkündür. Bu durumda sistem sığasının  $(R_1 + R_2)/3$  olduğu söylenebilir. Bu sonuca kanalların servis dışı kalma olasılıklarının sıfıra yakınsadığı durumda sistemin  $S_0$ ,  $S_1$  ve  $S_2$  bellek durumlarında eşit ve  $1/3$  olasılıkla bulunacağı bilgisi altında;  $S_0$  durumunda  $R_1$ ,  $S_1$  durumunda  $R_2$  ve  $S_2$  durumunda  $(R_1 + R_2)$  miktarında bilgi bitinin hedefe aktarılacağı ve kaynakların ilettiğiyle rölenin ilettiği bilgi bitlerinin birbirinin kopyası olduğu bilindiğine göre sistem sığasına  $1/2(R_1/3 + R_2/3 + (R_1 + R_2)/3) = (R_1 + R_2)/3$  şeklinde de ulaşılabilir.

#### 5.1.2.2 Enerji verimliliği

Şekil 5.2’de verilen yapının yedi durumlu bellek geçişlerine sahip olduğu görülmektedir. Sistemin enerji verimliliği bir çevrimlik iletişim sonunda harcanan toplam enerjinin iletilen toplam bilgi bitine oranı olarak verilebilir. Bu bilgi ışığında (4.8)’de verildiği üzere bit başına ortalama enerji verimliliği

$$E_b = \frac{\left( p(S_0)E(S_0) + p(S_{10})E(S_{10}) + p(S_{01})E(S_{01}) + p(S_1)E(S_1) \right.}{\eta} \quad (5.27)$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $E(S_i)$  her bir bellek durumunda harcanan ortalama enerji miktarını göstermekte olup (4.9)’a göre Protokol – 1 için aşağıda belirtildiği gibi hesaplanabilir:

$$E(S_0) = \frac{P_1}{1 - p_{1R}p_{1D}}, \quad (5.28)$$

$$E(S_{10}) = \frac{P_1}{1 - p_{1D}}, \quad (5.29)$$

$$E(S_{01}) = \frac{P_1}{1 - p_{1R}}, \quad (5.30)$$

$$E(S_1) = \frac{P_2}{1 - p_{2R}p_{2D}}, \quad (5.31)$$

$$E(S_{20}) = \frac{P_2}{1 - p_{2D}}, \quad (5.32)$$

$$E(S_{02}) = \frac{P_2}{1 - p_{2R}}, \quad (5.33)$$

$$E(S_2) = \frac{2P_R}{1 - p_{RD}}. \quad (5.34)$$

### 5.1.3 Protokol - 2

Ayrık – zamanlı iletişimde, Protokol – 1 ile benzer şekilde röle ve hedefte ARQ kullanıldığı durum için tasarlanan Protokol – 2’de ise temel amaç hedef birime  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının bilgi işaretlerini doğrudan veya röle üzerinden en hızlı şekilde aktarmaktır. Eğer bilgi işareti kaynak iletimi sırasında (birinci veya ikinci zaman aralığı) hedef tarafından başarılı bir şekilde alınmışsa röle o bilgi işareti için söz konusu iletim periyodunda devre dışı kalmaktadır. Bu yolla sistem sığasının daha yüksek tutulması amaçlanmaktadır. Öte yandan uç birim kaynaklarının asimetrik olduğu (iletim gücü, kanal yapısı, hız) durumlarda Protokol – 2’nin (ve Protokol – 2’nin türevi olan Protokol – 4, Protokol – 6’nın) adil kullanım anlamında dar boğaza neden olabileceği ön görülebilir. Konuyla ilgili ayrıntılı yaklaşımlar Bölüm 5.5’teki Benzetim Sonuçları kısmında verilecektir. Bu sistem için Şekil 5.3’te verilen Markov zinciri için aşağıdaki kurallar geçerlidir:

- $S_0$ : Başlangıç durumudur ya da  $T_1$ ’in işareti hem röle hem de hedef tarafından hatalı alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$ ’in işaretinin röle ve hedef tarafından hatalı, röle tarafından doğru hedef tarafından hatalı ve hedef tarafından doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_{10}$ :  $T_1$ ’in bilgi işareti hedef tarafından başarılı bir şekilde alınmıştır. Bu nedenle rölenin  $T_1$ ’in bilgi işaretini çözmesi, belleklemesi gerekmemektedir.

Sıradaki zaman aralığında  $T_2$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_2$ 'nin işaretinin röle ve hedef tarafından hatalı, röle tarafından doğru hedef tarafından hatalı ve hedef tarafından doğru alınması olarak verilebilir.

- $S_{01}$ :  $T_1$ 'in bilgi işareti röle tarafından doğru, hedef tarafından hatalı bir şekilde alınmıştır. Röle belleğinde yalnızca  $T_1$ 'in bilgi işareti vardır. Sıradaki zaman aralığında  $T_2$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_2$ 'nin işaretinin röle ve hedef tarafından hatalı, röle tarafından doğru hedef tarafından hatalı ve hedef tarafından doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_1$ :  $T_2$ 'nin bilgi işareti röle tarafından doğru, hedef tarafından hatalı bir şekilde alınmıştır. Röle belleğinde yalnızca  $T_2$ 'nin bilgi işareti vardır. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$ 'in işaretinin röle ve hedef tarafından hatalı, röle tarafından doğru hedef tarafından hatalı ve hedef tarafından doğru alınması olarak verilebilir.
- $S_R$ :  $T_1$  ya da  $T_2$ 'nin işareti (bir önceki bellek durumuna göre) röle tarafından başarılı bir şekilde alınmıştır. Röle belleğinde  $T_1$  ve  $T_2$  bilgi işaretleri vardır. Sıradaki zaman aralığında röle iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; rölenin gönderdiği  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi dizisini içeren işaretin hedef tarafından hatalı veya doğru alınması olarak verilebilir.

### 5.1.3.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği

Rayleigh sönümlemeli kanallarda her bir kanal için iletim hızının kanalın iletim sığasının üzerinde kalma olasılığı Protokol – 1 için (5.6-5.10)'da verildiği gibidir.

Şekil 5.3'te verilen Markov zinciri uyarınca ise sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{01}$ ,  $S_1$  ve  $S_R$ 'de olma olasılıkları olan  $p(S_0)$ ,  $p(S_{10})$ ,  $p(S_{01})$ ,  $p(S_1)$  ve  $p(S_R)$  ise

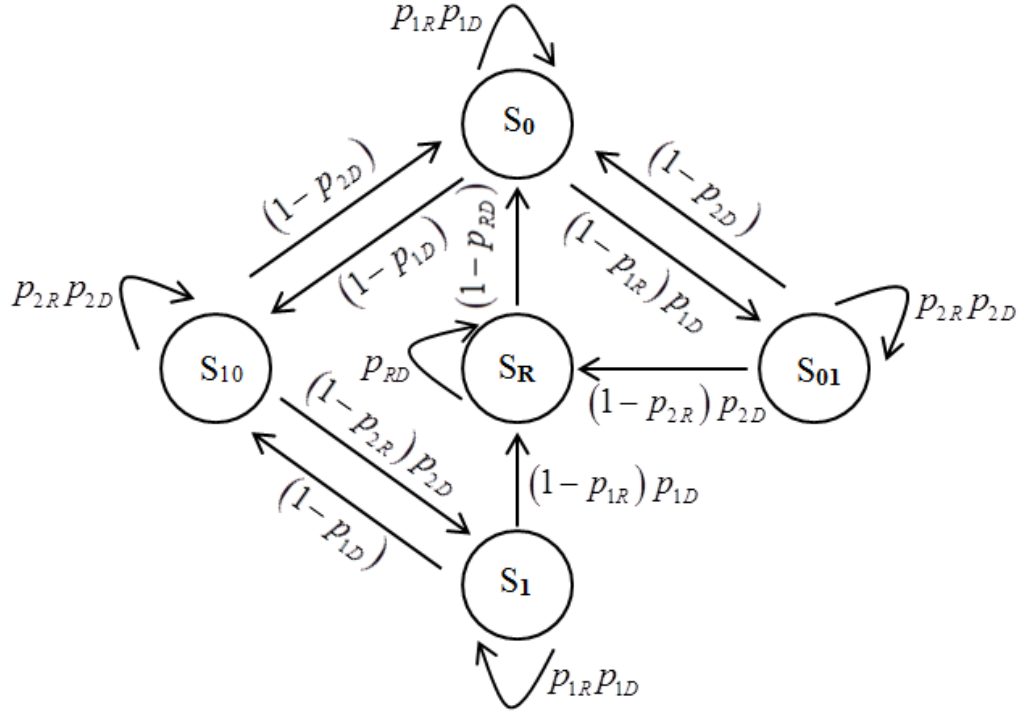
$$p(S_0) = p(S_0)p_{1R}p_{1D} + p(S_{10})(1 - p_{2D}) + p(S_{01})(1 - p_{2D}) + p(S_R)(1 - p_{RD}), \quad (5.35)$$

$$p(S_{10}) = p(S_0)(1 - p_{1D}) + p(S_{10})p_{2R}p_{2D} + p(S_1)(1 - p_{1D}), \quad (5.36)$$

$$p(S_{01}) = p(S_0)(1 - p_{1R})p_{1D} + p(S_{01})p_{2R}p_{2D}, \quad (5.37)$$

$$p(S_1) = p(S_{10})(1 - p_{2R})p_{2D} + p(S_1)p_{1R}p_{1D}, \quad (5.38)$$

$$p(S_R) = p(S_{01})(1 - p_{2R})p_{2D} + p(S_1)(1 - p_{1R})p_{1D} + p(S_R)p_{RD} \quad (5.39)$$



**Şekil 5.3 :** Protokol – 2 için Markov zinciri.

şeklinde verilebilir. (5.35-5.39) denklemleri çözülürse sistemin her bir bellek durumunda bulunma olasılıkları  $p(S_{10})$  cinsinden

$$A = \frac{1 - p_{2R}p_{2D}}{1 - p_{1D}} - \frac{(1 - p_{2R})p_{2D}}{1 - p_{1R}p_{1D}} \quad (5.40)$$

olmak üzere

$$p(S_0) = A p(S_{10}), \quad (5.41)$$

$$p(S_{01}) = \frac{(1 - p_{1R})p_{1D}}{1 - p_{2R}p_{2D}} A p(S_{10}), \quad (5.42)$$

$$p(S_1) = \frac{(1 - p_{2R})p_{2D}}{(1 - p_{1R}p_{1D})} p(S_{10}), \quad (5.43)$$

$$p(S_R) = \frac{(1 - p_{1R})p_{1D}(1 - p_{2R})p_{2D}}{1 - p_{RD}} \left( \frac{1}{1 - p_{1R}p_{1D}} + A \frac{1}{1 - p_{2R}p_{2D}} \right) p(S_{10}) \quad (5.44)$$

olup sistemin bu bellek durumlarından herhangi birinde bulunması gerektiği yani

$$p(S_0) + p(S_{10}) + p(S_{01}) + p(S_1) + p(S_R) = 1 \quad (5.45)$$

koşulu altında her bir bellek durumunun ortaya çıkma olasılığı ayrı ayrı hesaplanabilir. Sonuç olarak (4.7)'ye göre sistemin bit iletim verimliliği

$$\eta = R_1 p(S_0)(1 - p_{1D}) + R_2 p(S_{10})(1 - p_{2D}) + R_2 p(S_{01})(1 - p_{2D}) + R_1 p(S_1)(1 - p_{1D}) + (R_1 + R_2) p(S_R)(1 - p_{RD}) \quad (5.46)$$

olup (5.46)'da gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\eta = R_1 (p(S_0) + p(S_1))(1 - p_{1D}) + R_2 (p(S_{10}) + p(S_{01}))(1 - p_{2D}) + (R_1 + R_2) p(S_R)(1 - p_{RD}) \quad (5.47)$$

elde edilir. Protokol – 2  $T_1$  ve  $T_2$  bilgi işaretlerinin birden fazla başarılı kopyasının hedefe iletilmesini engeller. Bu yolla da Protokol – 1'e göre daha yüksek bit iletim verimliliği sağlaması beklenir.

Protokol – 2'nin sistem sığası ise (4.10) kullanılarak  $(R_1 + R_2)/2$  olarak hesaplanabilir. Bu sonuç  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının iki zaman aralığı sonunda hedefte  $R_1$  ve  $R_2$  hızlı bilgi dizilerini başarılı bir şekilde aktarmaları sonucunda röle fazının es geçilmesiyle elde edilir. Diğer bir deyişle servis dışı kalınmayan kanallarda  $S_0$  ve  $S_{10}$  bellek olasılıklarının  $1/2$  olması,  $S_0$  bellek durumunda  $R_1$  ve  $S_{10}$  bellek durumunda  $R_2$  miktarında bilgi bitinin hedefe başarılı olarak aktarılmasıyla bu sonuca ulaşılır.

### 5.1.3.2 Enerji verimliliği

Şekil 5.3'te verilen Markov zinciri yapısının beş durumlu bellek geçişlerine sahip olduğu görülmektedir. Sistemin enerji verimliliği (4.8)'de verildiği üzere bir çevrimlik iletişim sonunda harcanan toplam enerjinin iletilen toplam bilgi miktarına oranı olarak verilebilir. Bu bilgi ışığında Protokol – 2 için ortalama enerji tüketimi

$$E_b = \frac{p(S_0)E(S_0) + p(S_{10})E(S_{10}) + p(S_{01})E(S_{01}) + p(S_1)E(S_1) + p(S_R)E(S_R)}{\eta} \quad (5.48)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada  $E(S_i)$  her bir bellek durumunda harcanan ortalama enerji miktarını göstermekte olup (4.9) kullanılarak Protokol – 2 için aşağıda belirtildiği üzere hesaplanabilir:

$$E(S_0) = \frac{P_1}{1 - p_{1R} p_{1D}}, \quad (5.49)$$

$$E(S_{10}) = \frac{P_2}{1 - p_{2R} p_{2D}}, \quad (5.50)$$

$$E(S_{01}) = \frac{P_2}{1 - p_{2R} p_{2D}}, \quad (5.51)$$

$$E(S_1) = \frac{P_1}{1 - p_{1R} p_{1D}}, \quad (5.52)$$

$$E(S_R) = \frac{2P_R}{1 - p_{RD}}. \quad (5.53)$$

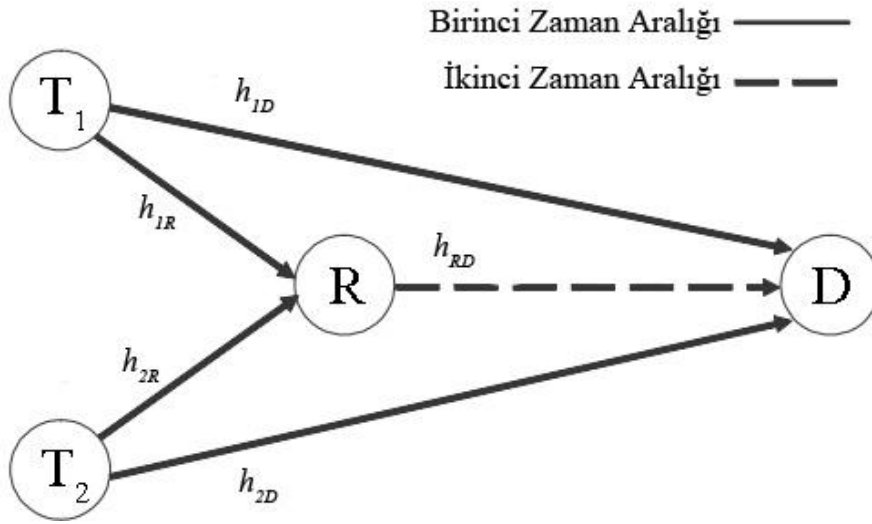
## 5.2 Eş – Zamanlı İletişim

Bölüm 4'te anlatılan iletim hızı ve kanal sığası arasındaki ilişki üzerinden sistem başarımının hesaplanması, Bölüm 5.1'de kaynak birimlerin farklı zaman aralıklarında aktarımda bulunduğu ayırık – zamanlı durumdaki gibi, Şekil 5.4'te verilen kaynak birimlerin aynı zaman aralığında aktarımda bulunduğu eş – zamanlı yapı için de incelenebilir.

Şekil 5.4'te verilen sistemde  $T_1$  ve  $T_2$  kaynakları hedef ile röle üzerinden ve doğrudan iletişim sağlamaktadır. Birinci kaynak birimi olan  $T_1$  ile röle birimi R arasındaki kanal sönümleme katsayısı  $h_{1R}$ , ikinci kaynak birimi olan  $T_2$  ile R arasındaki  $h_{2R}$  ile gösterilmiştir. Benzer şekilde  $T_1$  ile hedef birimi D arasındaki kanal sönümleme katsayısı  $h_{1D}$ ,  $T_2$  ile D arasındaki  $h_{2D}$  ve R ile D arasındaki ise  $h_{RD}$  ile gösterilmiştir.

Verilen sistem yapısı için dört farklı protokol önerilmiş olup bunlardan Protokol – 3 ve Protokol – 5, Bölüm 5.1.2'de önerilen Protokol – 1 temel alınarak (güvenilir sistem) yalnızca hedefin ve yalnızca rölenin geri beslemede bulunduğu durumlar için geçerlidir. Protokol – 4 ve Protokol – 6 ise Bölüm 5.1.3'te önerilen Protokol – 2 temel alınarak (hızlı sistem) yalnızca hedefin geri beslemede bulunduğu durum için geçerlidir. Sadece rölenin geri beslemede bulunduğu durum için Protokol – 2

yapısında normalize bit iletim verimliliğini 2 yapan (yeterince yüksek SNR değerleri için bir zaman aralığında yapılan iletişim sonunda her iki kaynağın bilgi işaretlerinin hedef tarafından başarılı bir şekilde çözülmesine dayanan) hız odaklı bir yapı önerilememiştir. Çünkü hız odaklı bu yapıda ilk zaman aralığı sonunda hedefin aldığı işaret üzerinde ARQ uygulaması gerekmektedir ki yalnızca rölenin geri besleme yaptığı durumda bu teknik olarak mümkün değildir. Yine de önerilmiş olan Protokol – 6, yalnızca rölede ARQ uygulanması durumunda bit iletim verimliliğini en büyük tutmayı hedefleyen yapıdadır. Röle ve hedefin birlikte geri beslemede bulunduğu sistem tasarımı ise yüksek karmaşıklığı nedeniyle yapılmamıştır. ARQ protokolleriyle ilgili ayrıntılı bilgiye EK A'dan ulaşılabilir.



Şekil 5.4 : Eş – zamanlı iletişim sistem yapısı.

### 5.2.1 Sistem yapısı

Kaynak düğümlerin bilgi dizilerini aynı anda ilettiği Şekil 5.4'te verilen sistem için ilk iletim periyodunda  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte, ikinci iletim periyodunda röle iletim yapmaktadır. İlk iletim periyodu sonunda röle ve hedef alıcı girişlerinde elde edilen  $y_R$  ve  $y_D$  işaretleri

$$y_R = h_{1R}\sqrt{P_1}\theta_1x_1 + h_{2R}\sqrt{P_2}\theta_2x_2 + n_R, \quad (5.54)$$

$$y_D = h_{1D}\sqrt{P_1}\theta_1x_1 + h_{2D}\sqrt{P_2}\theta_2x_2 + n_D \quad (5.55)$$

olarak verilebilir. İşaretleşme sonunda röle  $y_R$  uyarınca  $\hat{x}_1^R$  ve  $\hat{x}_2^R$  kestiriminde bulunabilir. İkinci işaretleşme aralığında röle iletimi neticesinde hedef alıcı girişlerinde oluşan işaret

$$y_{RD} = h_{RD} \sqrt{P_R} (\theta_1 \hat{x}_1^R + \theta_2 \hat{x}_2^R) + n_{RD} \quad (5.56)$$

olarak verilebilir. İki işaretleşme periyodu sonunda hedef, her iki kaynak birimin işaretini ortak bir ML çözücü yardımıyla kestirebilir.

Bölüm 5.2 boyunca verilen kanal dağılımları  $h_{1R} \sim CN(0, \sigma_{1R}^2)$ ,  $h_{2R} \sim CN(0, \sigma_{2R}^2)$ ,  $h_{1D} \sim CN(0, \sigma_{1D}^2)$ ,  $h_{2D} \sim CN(0, \sigma_{2D}^2)$  ve  $h_{RD} \sim CN(0, \sigma_{RD}^2)$  olarak alınmıştır. Ayrıca birinci zaman aralığı sonunda röle ve hedef alıcı girişi, ikinci zaman aralığı sonunda hedef alıcı girişinde elde edilen  $n_R$ ,  $n_D$  ve  $n_{RD}$  gürültüleri sırasıyla  $n_R \sim CN(0, \sigma_{n_R}^2)$ ,  $n_D \sim CN(0, \sigma_{n_D}^2)$  ve  $n_{RD} \sim CN(0, \sigma_{n_{RD}}^2)$  dağılımlarıyla hesaplamalara katılmıştır.

### 5.2.2 Protokol – 3

Eş – zamanlı iletişimde, yalnızca hedefte ARQ kullanıldığı durum için tasarlanan sistemde temel odak hedef birime  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının bilgi işaretlerini hem doğrudan hem de röle üzerinden aktarmaktır. Röle katkısını garanti altına almak için hedef birimde ARQ bir çevrimlik iletişim sonunda (rölenin aktarımı sonrasında) uygulanmaktadır. Protokol – 3'te röle üzerinde herhangi bir hata kontrolü yapılmamaktadır ve bir çevrimlik iletişimin sonunda röle üzerinden  $T_1$  ve  $T_2$  işaretlerinin iletimi mutlak olarak beklendiği için iki zaman aralığı sonunda (kaynak ve röle işaret iletimini tamamladıktan sonra) herhangi bir işaretin tekrarlanmasındansa yeni iletişim çevrimine geçmek daha verimlidir. Dolayısıyla, tamamlanan iletişim çevrimi sonrasında bilgi dizisi doğru iletilen kaynak sıradaki işaretini, hatalı iletilense aynı işaretini tekrar aktarır. Yeni çevrimde hangi kaynağın hangi işaretini (sıradaki işaret mi yoksa aynı işareti mi) ileteceği sistemin son bulunduğu bellek durumundan belirlenir. Şekil 5.5'te Protokol – 3 için verilen Markov zinciri aşağıdaki kuralları içermektedir:

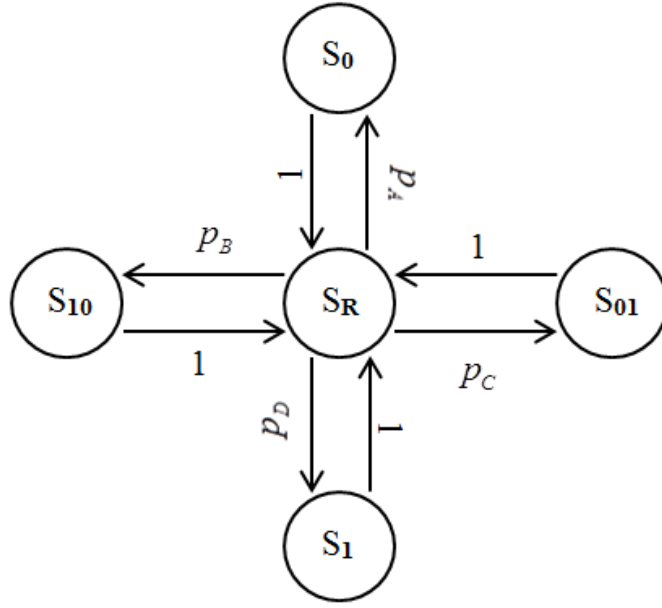
- $S_0$ : Başlangıç durumudur ya da hem  $T_1$  hem de  $T_2$ 'nin işareti hedef tarafından hatalı çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim

yapacaktır. İletim sonrası röle ve hedef  $T_1$ ,  $T_2$ 'nin bilgi işaretlerini alırlar ve oluşan tek durum rölenin iletim periyoduna geçilmesi olarak verilebilir.

- $S_{10}$ : Hedef tarafından  $T_1$ 'in işareti başarılı  $T_2$ 'nin işareti hatalı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası röle ve hedef  $T_1$ ,  $T_2$ 'nin bilgi işaretlerini alırlar ve oluşan tek durum rölenin iletim periyoduna geçilmesi olarak verilebilir.
- $S_{01}$ : Hedef tarafından  $T_1$ 'in işareti hatalı  $T_2$ 'nin işareti başarılı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası röle ve hedef  $T_1$ ,  $T_2$ 'nin bilgi işaretlerini alırlar ve oluşan tek durum rölenin iletim periyoduna geçilmesi olarak verilebilir.
- $S_1$ : Hem  $T_1$  hem de  $T_2$ 'nin işareti hedef tarafından başarılı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası röle ve hedef  $T_1$ ,  $T_2$ 'nin bilgi işaretlerini alırlar ve oluşan tek durum rölenin iletim periyoduna geçilmesi olarak verilebilir.
- $S_R$ :  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi işaretleri röle tarafından alınmıştır. Sıradaki zaman aralığında röle iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar;  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi işaretlerinin doğrudan kaynak – hedef arasındaki iletişimle ya da rölenin gönderdiği  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi dizisini içeren işaretin hedef tarafından dört farklı şekilde alınması olarak verilebilir. Bu durumlar her iki kaynağın işaretinin hatalı,  $T_1$ 'in işaretinin hatalı  $T_2$ 'nin işaretinin doğru,  $T_1$ 'in işaretinin doğru  $T_2$ 'nin işaretinin hatalı ve her iki kaynağın işaretinin doğru alınması olarak verilebilir.

#### 5.2.2.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği

Protokol – 3 için,  $p_{0_R}$  rölede  $T_1$  ve  $T_2$  için her iki kanal sığasının iletim hızının altında kalması,  $p_{10_R}$  yalnızca  $h_{2_R}$  kanalının  $T_2$ -R arasındaki iletim hızının altında kalması,  $p_{01_R}$  yalnızca  $h_{1_R}$  kanalının  $T_1$ -R arasındaki iletim hızının altında kalması,  $p_{1_R}$  ise rölede  $T_1$  ve  $T_2$  için her iki kanal sığasının iletim hızlarının üstünde olması olasılıkları olarak verilebilir. Böylece kaynaklar ve röle arasındaki kanallarda her bir kanal için servis dışı kalma olasılıkları



Şekil 5.5 : Protokol – 3 için Markov zinciri.

$$X = \frac{-(2^{R_2} - 1)\sigma_{n_R}^2}{\sigma_{2R}^2 P_2}, \quad (5.57)$$

$$Y = \frac{-(2^{R_1} - 1)\sigma_{n_R}^2}{\sigma_{1R}^2 P_1}, \quad (5.58)$$

$$W = \frac{\sigma_{1R}^2 P_1}{(2^{R_1} - 1)\sigma_{2R}^2 P_2}, \quad (5.59)$$

$$Z = \frac{(2^{R_1+R_2} - 1)\sigma_{n_R}^2}{\sigma_{2R}^2 P_2} \quad (5.60)$$

olmak üzere şu şekilde verilebilir:

$$p_{0_R} = 1 - e^{-Y} + \frac{e^{\frac{-X\sigma_{1R}^2 P_1}{\sigma_{n_R}^2}}}{X+1} (e^{-Y(X+1)} - 1) + \frac{e^{2^{R_2} Y}}{Z+1} (e^{-Y(Z+1)} - e^{-W(Z+1)}) + e^{\frac{-\sigma_{n_R}^2}{\sigma_{2R}^2 P_2}} (Y - W), \quad (5.61)$$

$$p_{10_R} = \frac{\sigma_{1R}^2 P_1}{\sigma_{1R}^2 P_1 + (2^{R_1} - 1)\sigma_{2R}^2 P_2} \left( e^{-X} - e^{-Y} e^{-(Y+2^{R_1} X)} \right), \quad (5.62)$$

$$p_{01_R} = \frac{\sigma_{2R}^2 P_2}{\sigma_{2R}^2 P_2 + (2^{R_2} - 1) \sigma_{1R}^2 P_1} \left( e^{-Y} - e^{-X} e^{-(X+2^{R_2} Y)} \right), \quad (5.63)$$

$$p_{1_R} = 1 - (p_{0_R} + p_{10_R} + p_{01_R}). \quad (5.64)$$

$T_1$ ,  $T_2$  iletimi sırasında hedefte elde edilen servis dışı kalma olasılıkları  $p_{0_D}$ ,  $p_{10_D}$ ,  $p_{01_D}$  ve  $p_{1_D}$  de (5.61-5.64)'le benzer şekilde verilir. Bu servis dışı kalma olasılıklarını elde etmek için (5.57-5.60) ve (5.61-5.64)'te kanal değişimleri ve alıcı girişindeki Gauss gürültüsü için şu değişiklikler uygulanır:  $\sigma_{1R}^2 \rightarrow \sigma_{1D}^2$ ,  $\sigma_{2R}^2 \rightarrow \sigma_{2D}^2$ ,  $\sigma_{n_R}^2 \rightarrow \sigma_{n_D}^2$ .

Kaynakların aynı anda iletim yaptığı durumda verilen (5.61-5.64) servis dışı kalma olasılıkları için matematiksel çıkarımlar EK B'de verilmiştir.

Röle – hedef arasındaki iletişimin servis dışı kalma olasılığı (5.6-5.10)'daki servis dışı kalma olasılıklarıyla benzer olup  $2R$  hızı ve  $2P_R$  gücüyle iletim yapıldığı durum için şöyle verilir:

$$p_{RD} = 1 - e^{-\frac{(2^{2R} - 1) \sigma_{n_{RD}}^2}{\sigma_{RD}^2 2P_R}}. \quad (5.65)$$

(5.61-5.64) kullanılarak Şekil 5.5'te verilen, birinci zaman aralığında  $T_1$ -D,  $T_2$ -D ve ikinci zaman aralığında R-D kanallarındaki iletişimi içeren kaynak – hedef arası ortak geçiş olasılıkları

$$p_A = p_{0_D} p_{0_R} + p_{0_D} p_{RD} (p_{10_R} + p_{01_R} + p_{1_R}), \quad (5.66)$$

$$p_B = p_{10_D} (p_{0_R} + p_{10_R} + (p_{01_R} + p_{1_R}) p_{RD}) + p_{0_D} p_{10_R} (1 - p_{RD}), \quad (5.67)$$

$$p_C = p_{01_D} (p_{0_R} + p_{01_R} + (p_{10_R} + p_{1_R}) p_{RD}) + p_{0_D} p_{01_R} (1 - p_{RD}), \quad (5.68)$$

$$p_D = p_{1_D} + (1 - p_{RD}) ((1 - p_{1_D}) p_{1_R} + p_{01_D} p_{10_R} + p_{10_D} p_{01_R}) \quad (5.69)$$

olup Şekil 5.5'te verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{01}$ ,  $S_1$  ve  $S_R$  durumlarında olma olasılıkları

$$p(S_0) = p(S_R)p_A, \quad (5.70)$$

$$p(S_{10}) = p(S_R)p_B, \quad (5.71)$$

$$p(S_{01}) = p(S_R)p_C, \quad (5.72)$$

$$p(S_1) = p(S_R)p_D, \quad (5.73)$$

$$p(S_R) = \frac{1}{2} \quad (5.74)$$

şeklinde verilebilir. Sonuç olarak (4.7)'ye göre Protokol – 3'ün bit iletim verimliliği

$$\eta = R_1 p(S_R)p_B + R_2 p(S_R)p_C + (R_1 + R_2)p(S_R)p_D \quad (5.75)$$

olup (5.75)'te gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\eta = p(S_R)((R_1 + R_2)p_D + R_1 p_B + R_2 p_C) \quad (5.76)$$

olarak verilebilir. Protokol – 3 için hedef hem kaynaklardan hem de röleden bilgi dizilerinin farklı kopyalarını alıyor olmasına karşın (5.76)'da (5.26)'nın aksine 0.5 ile ağırlıklandırma yapılmamıştır. Çünkü (5.66-5.69)'daki geçiş olasılıkları kaynak – hedef ve röle – hedef kanalları için ortak yazılmıştır.

Protokol – 3'ün sistem sığası (4.10)'da verildiği üzere  $(R_1 + R_2)/2$  olduğu söylenebilir. Bu sonuca kaynaklar ve rölenin iletim yaptığı iki zaman aralığı sonunda  $T_1$ 'in  $R_1$ ,  $T_2$ 'nin  $R_2$  hızlı bilgi işaretleri hedefe doğru olarak aktarıldığı bilgisi altında ulaşılır. Benzer şekilde yeterince yüksek SNR değeri için  $1/2$  olasılıklı  $S_R$  bellek durumundan  $p_D = 1$  olasılıkla  $S_{11}$  durumuna geçilmesi sonucunda en büyük bit iletim hızının  $(R_1 + R_2)/2$  olarak verilebileceği söylenebilir.

### 5.2.2.2 Enerji verimliliği

Şekil 5.5'te verilen yapının beş durumlu bellek geçişlerine sahip Protokol – 3'ün ortalama enerji tüketimi (4.8)'e göre

$$E_b = \frac{p(S_0)E(S_0) + p(S_{10})E(S_{10}) + p(S_{01})E(S_{01}) + p(S_1)E(S_1) + p(S_R)E(S_R)}{\eta} \quad (5.77)$$

şeklinde hesaplanır. Her bir bellek durumunda harcanan ortalama enerji miktarını ise (4.9)'a göre aşağıda belirtildiği üzere verilir:

$$E(S_0) = P_1 + P_2, \quad (5.78)$$

$$E(S_{10}) = P_1 + P_2, \quad (5.79)$$

$$E(S_{01}) = P_1 + P_2, \quad (5.80)$$

$$E(S_1) = P_1 + P_2, \quad (5.81)$$

$$E(S_R) = 2P_R. \quad (5.82)$$

### 5.2.3 Protokol – 4

Eş – zamanlı iletişimde, yalnızca hedefte ARQ kullanıldığı durum için tasarlanan Protokol – 4'te temel amaç hedef birime  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının bilgi işaretlerini en hızlı şekilde aktarmaktır. Eğer birinci zaman aralığı sonunda hedef  $T_1$ ,  $T_2$  bilgi işaretlerini başarılı bir şekilde aldıysa ikinci zaman aralığı (röle iletim periyodu) es geçilmektedir. Bu durum rölenin varlığını sekteye uğratmamakta  $T_1$ -D,  $T_2$ -D kanallarının ikisinin birden çevrim dışı kaldığı durumda röle katkısından yararlanılmaktadır. Bit iletim verimliliğinin yine kanal sığası yardımıyla hesaplanabileceği bu sistem için Şekil 5.6'da verilen Markov zincirinde aşağıdaki kurallar geçerlidir:

- $S_0$ : Başlangıç durumudur ya da hem  $T_1$  hem de  $T_2$ 'nin işareti hedef tarafından hatalı çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; her iki kaynağın bilgi işaretinin hedef tarafından hatalı çözülmesi,  $T_1$ 'in bilgi işaretinin hatalı  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin başarılı,  $T_1$ 'in bilgi işaretinin başarılı  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin hatalı ve her iki kaynağın bilgi işaretinin başarılı bir şekilde çözülmesi olarak verilebilir.

- $S_{10}$ : Hedef tarafından  $T_1$ 'in işareti başarılı  $T_2$ 'nin işareti hatalı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; her iki kaynağın bilgi işaretinin hedef tarafından hatalı çözülmesi,  $T_1$ 'in bilgi işaretinin hatalı  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin başarılı,  $T_1$ 'in bilgi işaretinin başarılı  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin hatalı ve her iki kaynağın bilgi işaretinin başarılı bir şekilde çözülmesi olarak verilebilir.
- $S_{01}$ : Hedef tarafından  $T_1$ 'in işareti hatalı  $T_2$ 'nin işareti başarılı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; her iki kaynağın bilgi işaretinin hedef tarafından hatalı çözülmesi,  $T_1$ 'in bilgi işaretinin hatalı  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin başarılı,  $T_1$ 'in bilgi işaretinin başarılı  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin hatalı ve her iki kaynağın bilgi işaretinin başarılı bir şekilde çözülmesi olarak verilebilir.
- $S_1$ : Hem  $T_1$  hem de  $T_2$ 'nin işareti hedef tarafından başarılı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; her iki kaynağın bilgi işaretinin hedef tarafından hatalı çözülmesi,  $T_1$ 'in bilgi işaretinin hatalı  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin başarılı,  $T_1$ 'in bilgi işaretinin başarılı  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin hatalı ve her iki kaynağın bilgi işaretinin başarılı bir şekilde çözülmesi olarak verilebilir.
- $S_R$ :  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi işaretleri röle tarafından alınmış ve her ikisinin de işaretleri hedef tarafından hatalı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında röle iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; rölenin gönderdiği  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi dizisini içeren işaretin hedef tarafından hatalı ya da başarılı çözülmesi olarak verilir.

### 5.2.3.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği

Shannon'ın kanal sığası formülü uyarınca Rayleigh sönümlemeli kanallarda her bir kanal için iletim hızı  $R$ 'nin kanalın iletim sığası olan  $R^{th}$ 'nin üzerinde kalması (5.61-5.65)'teki gibi verilebilir. Yine (5.61-5.65) uyarınca Şekil 5.6'da verilen  $p_A$ ,  $p_B$ ,  $p_C$  ve  $p_D$  röle ortak geçiş olasılıkları (kaynak – röle, röle – hedef)

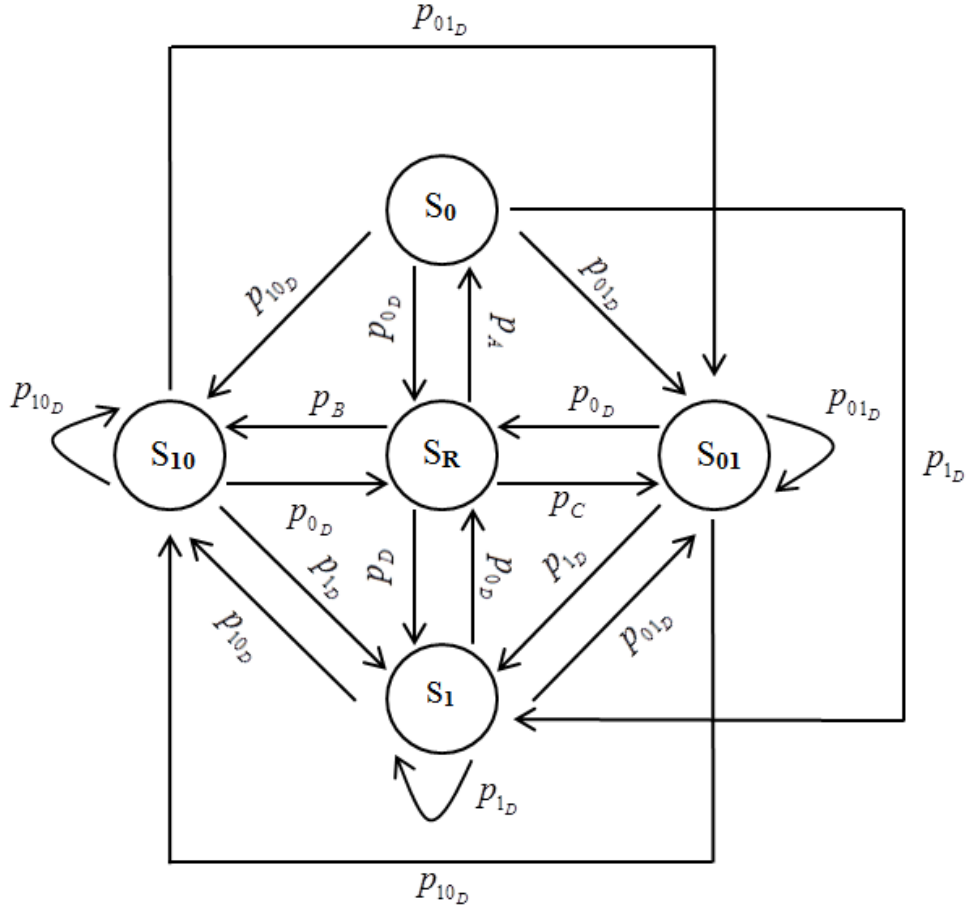
$$p_A = p_{0_R} + p_{RD}(p_{10_R} + p_{01_R} + p_{1_R}), \quad (5.83)$$

$$p_B = p_{10_R}(1 - p_{RD}), \quad (5.84)$$

$$p_C = p_{01_R}(1 - p_{RD}), \quad (5.85)$$

$$p_D = p_{1_R}(1 - p_{RD}) \quad (5.86)$$

eşitliklerinden hesaplanır.



Şekil 5.6 : Protokol – 4 için Markov zinciri.

Şekil 5.6’da verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{01}$ ,  $S_1$  ve  $S_R$  durumlarında olma olasılıkları

$$p(S_0) = p(S_R)p_A, \quad (5.87)$$

$$p(S_{10}) = p_{10_D}(1 - p(S_R)) + p(S_R)p_B, \quad (5.88)$$

$$p(S_{01}) = p_{01_D}(1 - p(S_R)) + p(S_R)p_C, \quad (5.89)$$

$$p(S_1) = p_{1_D} (1 - p(S_R)) + p(S_R) p_D, \quad (5.90)$$

$$p(S_R) = \frac{p_{0_D}}{1 + p_{0_D}} \quad (5.91)$$

şeklinde verilip (4.7)'ye göre Protokol – 4'ün bit iletim verimliliği

$$\begin{aligned} \eta = & R_1 p(S_0) p_{10_D} + R_2 p(S_0) p_{01_D} + (R_1 + R_2) p(S_0) p_{1_D} + R_1 p(S_{10}) p_{10_D} \\ & + R_2 p(S_{10}) p_{01_D} + (R_1 + R_2) p(S_{10}) p_{1_D} + R_1 p(S_{01}) p_{10_D} + R_2 p(S_{01}) p_{01_D} \\ & + (R_1 + R_2) p(S_{01}) p_{1_D} + R_1 p(S_1) p_{10_D} + R_2 p(S_1) p_{01_D} + (R_1 + R_2) p(S_1) p_{1_D} \\ & + R_1 p(S_R) p_B + R_2 p(S_R) p_C + (R_1 + R_2) p(S_R) p_D \end{aligned} \quad (5.92)$$

olur ve (5.92) düzenlenirse

$$\begin{aligned} \eta = & (1 - p(S_R)) (R_1 p_{10_D} + R_2 p_{01_D} + (R_1 + R_2) p_{1_D}) \\ & + p(S_R) (R_1 p_B + R_2 p_C + (R_1 + R_2) p_D) \end{aligned} \quad (5.93)$$

olarak verilir.

Protokol – 4 sistem sığası olarak bu tez kapsamında incelenen yapılar içerisinde en verimlisidir. (4.10)'dan yararlanarak Protokol – 4'ün yeterince büyük SNR değerleri için  $R_1 + R_2$  iletim hızına ulaşabileceği öngörülebilir. Bu sonuç, düğümler arası kanallarda servis dışı kalma olasılıklarının sıfıra yakınsadığı durumda  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin iletim yaptığı birinci zaman aralığı sonunda her iki kaynağın bilgi dizisinin hedef tarafından doğru alınması (ve rölenin iletim yaptığı ikinci zaman aralığının es geçilmesi) ya da Şekil 5.6'da verilen Markov zincirinin sürekli olarak  $S_1$  bellek durumunda kalmasıyla açıklanabilir ( $p(S_1) = 1$ ,  $p_{1_D} = 1$ ).

### 5.2.3.2 Enerji verimliliği

Şekil 5.6'da verilen yapının beş durumlu bellek geçişlerine sahip olduğu görülmektedir. Protokol – 3 için her bir bellek durumunda harcanan enerji miktarı (4.9)'dan görüleceği üzere Bölüm 5.2.2'de verilen Protokol – 3 ile aynıdır. Ayrıca aynı sayıda bellek durumuna sahip olduğu için enerji tüketimi (5.77)'deki gibi verilir. Burada dikkat çekici nokta, Protokol – 3 ve Protokol – 4 için her bellek durumunda tüketilen enerji miktarı aynı olsa da bellek durumlarının olasılıkları ve bit

iletim verimlilikleri farklıdır. Bu farklar da enerji verimliliği anlamında iki sistemi ayırt etmeye yeter.

#### 5.2.4 Protokol – 5

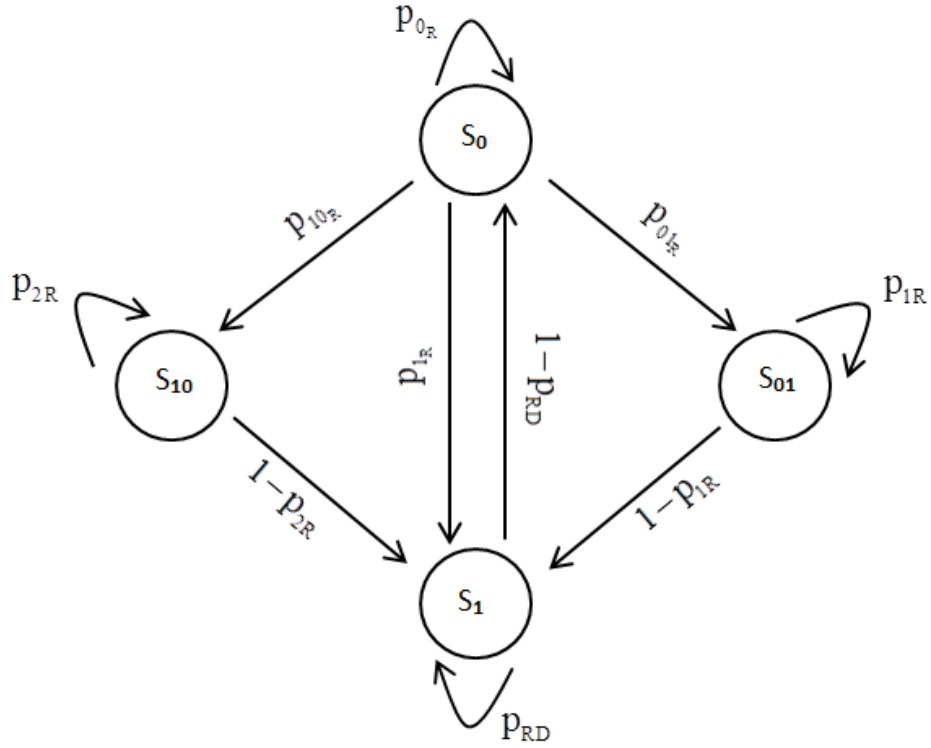
Eş – zamanlı iletişimde, yalnızca rölede ARQ kullanıldığı durum için tasarlanan sistemde temel amaç hedef birime  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının bilgi işaretlerini hem doğrudan hem de röle üzerinden aktarmaktır. Protokol – 5 röle temelli ARQ tekniği yardımıyla her işaretleşme çevrimi için  $T_1$  ve  $T_2$  bilgi işaretlerinin (birlikte) hedefe röle üzerinden doğru aktarılmasını garanti altına almaktadır. Şekil 5.7’de Protokol – 5 için verilen Markov zincirinde aşağıdaki kurallar sağlanmaktadır:

- $S_0$ : Başlangıç durumudur ya da hem  $T_1$  hem de  $T_2$ ’nin işareti röle tarafından hatalı çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; her iki kaynağın bilgi işaretinin röle tarafından hatalı çözülmesi,  $T_1$ ’in bilgi işaretinin hatalı  $T_2$ ’nin bilgi işaretinin başarılı,  $T_1$ ’in bilgi işaretinin başarılı  $T_2$ ’nin bilgi işaretinin hatalı ve her iki kaynağın bilgi işaretinin başarılı bir şekilde çözülmesi olarak verilebilir.
- $S_{10}$ : Röle tarafından  $T_1$ ’in işareti başarılı  $T_2$ ’nin işareti hatalı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_2$  iletim yapacaktır. İletim sonrası röle  $T_2$ ’nin bilgi işaretini alır ve olası durumlar rölenin bu işareti hatalı ya da doğru alması olarak verilebilir.
- $S_{01}$ : Röle tarafından  $T_1$ ’in işareti hatalı  $T_2$ ’nin işareti başarılı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  iletim yapacaktır. İletim sonrası röle  $T_1$ ’in bilgi işaretini alır ve olası durumlar rölenin bu işareti hatalı ya da doğru alması olarak verilebilir.
- $S_1$ : Hem  $T_1$  hem de  $T_2$ ’nin işareti röle tarafından başarılı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında röle iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar rölenin ilettiği  $T_1$  ve  $T_2$ ’nin bilgi dizisini içeren işaretin hedef tarafından hatalı ya da başarılı alınması olarak verilebilir.

##### 5.2.4.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği

Rayleigh sönümlemeli kanallarda Şekil 5.7’de verilen her bir kanal için servis dışı kalma olasılıkları (5.6-5.7) ve (5.61-5.65)’teki eşitliklerle verilebilir. Protokol – 5’in

Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{01}$  ve  $S_1$  durumlarında olma olasılıkları



Şekil 5.7 : Protokol – 5 için Markov zinciri.

$$p(S_0) = p_{0R} p(S_0) + (1 - p_{RD}) p(S_1), \quad (5.94)$$

$$p(S_{10}) = p_{10R} p(S_0) + p_{2R} p(S_{10}), \quad (5.95)$$

$$p(S_{01}) = p_{01R} p(S_0) + p_{1R} p(S_{01}), \quad (5.96)$$

$$p(S_1) = p_{1R} p(S_0) + (1 - p_{2R}) p(S_{10}) + (1 - p_{1R}) p(S_{01}) + p_{RD} p(S_1) \quad (5.97)$$

olup (5.94-5.97) denklemlerinden sistemin her bir bellek durumunda bulunma olasılıkları  $p(S_0)$  cinsinden

$$p(S_{10}) = \frac{p_{10R}}{1 - p_{2R}} p(S_0), \quad (5.98)$$

$$p(S_{01}) = \frac{p_{01R}}{1 - p_{1R}} p(S_0), \quad (5.99)$$

$$p(S_1) = \frac{1 - p_{0R}}{1 - p_{RD}} p(S_0) \quad (5.100)$$

olarak yazılır. Sistemin bu bellek durumlarından herhangi birinde bulunması gerektiği yani

$$p(S_0) + p(S_{10}) + p(S_{01}) + p(S_1) = 1 \quad (5.101)$$

koşulu altında her bir bellek durumunun ortaya çıkma olasılığı tek tek hesaplanabilir. Sonuç olarak sistemin bit iletim verimliliği (4.7)'ye göre:

$$\eta = (R_1 + R_2) p(S_1) (1 - p_{RD}) \quad (5.102)$$

olarak hesaplanır. Protokol – 5 ile ilgili dikkat çekici nokta sistem tasarımı dolayısıyla hem  $T_1$  hem de  $T_2$ 'nin işaretlerinin hedefe röle üzerinden mutlak olarak doğru aktarılması temel alındığı için bit iletim verimliliği hesabına  $T_1$ -D ve  $T_2$ -D arasındaki işaretleşmenin dahil edilmediğidir. Röle üzerinden iletim çevrimi sonunda (olası bellek tekrarlarıyla birlikte) aktarılan  $R_1 + R_2$ 'lik bilgi miktarı birinci zaman aralığında  $T_1$ -D ve  $T_2$ -D kanallarından aktarılan  $R_1$ ,  $R_2$  veya  $R_1 + R_2$ 'lik bilgi miktarına üst sınır teşkil ettiği için (5.102)'deki yalnızca röle üzerinden elde edilen bit iletim verimliliği hesabı geçerli durumdadır.

Protokol – 5 için sistem sığası (4.10) yardımıyla Protokol – 2 ve 3'le benzer şekilde  $(R_1 + R_2)/2$  olarak verilebilir. Sistemdeki tüm kanalların servis dışı kalma olasılıklarının sıfıra yakınsadığı durumda, Şekil 5.7'den hareketle Markov zinciri bellek geçişleri,  $S_0$  ile  $S_1$  arasında olup  $p(S_0) = 1/2$ ,  $p(S_1) = 1/2$  şeklindedir. Hedefe bilgi dizisi aktarımı yalnızca röle üzerinden ve  $R_1 + R_2$  hızıyla olduğu için sistem sığası  $(R_1 + R_2)/2$  şeklinde hesaplanır. Aynı yaklaşım sistem yapısı üzerinden, iki zaman aralığı sonunda rölenin hedefe ilettiği  $R_1 + R_2$  hızındaki işaret sonucunda da elde edilebilir.

#### 5.2.4.2 Enerji verimliliği

Şekil 5.7'de verilen yapının dört durumlu bellek geçişlerine sahip olduğu görülmektedir. Ortalama enerji tüketimi (4.8)'e göre

$$E_b = \frac{p(S_0)E(S_0) + p(S_{10})E(S_{10}) + p(S_{01})E(S_{01}) + p(S_1)E(S_1)}{\eta} \quad (5.103)$$

şeklinde olup (4.9) göz önünde bulundurularak  $E(S_0)$ ,  $E(S_{10})$ ,  $E(S_{01})$  ve  $E(S_1)$  için aşağıdaki eşitlikler verilebilir:

$$E(S_0) = \frac{P_1 + P_2}{1 - p_{0R}}, \quad (5.104)$$

$$E(S_{10}) = \frac{P_2}{1 - p_{2R}}, \quad (5.105)$$

$$E(S_{01}) = \frac{P_1}{1 - p_{1R}}, \quad (5.106)$$

$$E(S_1) = \frac{2P_R}{1 - p_{RD}}. \quad (5.107)$$

### 5.2.5 Protokol – 6

Eş – zamanlı iletişimde Protokol – 5’le benzer şekilde yalnızca rölede ARQ kullanıldığı durum için tasarlanan sistemde temel amaç hedef birime  $T_1$ ,  $T_2$  kaynaklarının bilgi işaretlerini hem doğrudan hem de röle üzerinden aktarmaktır. Protokol – 6 röle temelli ARQ tekniği yardımıyla her işaretleşme çevrimi için  $T_1$  veya  $T_2$  bilgi işaretlerinin (rölenin  $T_1$ ,  $T_2$  bilgi işaretlerini doğru aldığı durumlarda her ikisinin birden) hedefe röle üzerinden doğru aktarılmasını garanti altına almaktadır. Protokol – 6 için Şekil 5.8’de verilen Markov zincirinde aşağıdaki kurallar geçerlidir:

- $S_0$ : Başlangıç durumudur ya da hem  $T_1$  hem de  $T_2$ ’nin işareti röle tarafından hatalı çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında  $T_1$  ve  $T_2$  birlikte iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar; her iki kaynağın bilgi işaretinin röle tarafından hatalı çözülmesi,  $T_1$ ’in bilgi işaretinin hatalı  $T_2$ ’nin bilgi işaretinin başarılı,  $T_1$ ’in bilgi işaretinin başarılı  $T_2$ ’nin bilgi işaretinin hatalı ve her iki kaynağın bilgi işaretinin başarılı bir şekilde çözülmesi olarak verilebilir.
- $S_{10}$ : Röle tarafından  $T_1$ ’in işareti başarılı  $T_2$ ’nin işareti hatalı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında röle  $T_1$ ’in bilgi dizisi için iletim

yapacaktır. İletim sonrası hedef  $T_1$ 'in bilgi işaretini röle üzerinden alır ve olası durumlar rölenin bu işareti hatalı ya da doğru alması olarak verilebilir.

- $S_{01}$ : Röle tarafından  $T_1$ 'in işareti hatalı  $T_2$ 'nin işareti başarılı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında röle  $T_2$ 'nin bilgi dizisi için iletim yapacaktır. İletim sonrası hedef  $T_2$ 'nin bilgi işaretini röle üzerinden alır ve olası durumlar rölenin bu işareti hatalı ya da doğru alması olarak verilebilir.
- $S_1$ : Hem  $T_1$  hem de  $T_2$ 'nin işareti röle tarafından başarılı bir şekilde çözülmüştür. Sıradaki zaman aralığında röle iletim yapacaktır. İletim sonrası olası durumlar rölenin ilettiği  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin bilgi dizisini içeren işaretin hedef tarafından hatalı ya da başarılı alınması olarak verilebilir.

#### 5.2.5.1 Sistem sığası ve bit iletim verimliliği

Şekil 5.8'de verilen kaynak – röle ve röle – hedef arası kanalların servis dışı kalma olasılıkları (5.61-5.65)'e ek olarak röle – hedef arasındaki, (5.10)'a benzer fakat  $R$  hızı ve  $P_R$  gücündeki,  $T_1$  ya da  $T_2$ 'nin bilgi işaretlerinin (röle tarafından) aktarımı için servis dışı kalma olasılığı şu şekilde verilir:

$$p_{RD}^1 = 1 - e^{\frac{-(2^{R_1}-1)\sigma_{nRD}^2}{\sigma_{RD}^2 P_R}}, \quad (5.108)$$

$$p_{RD}^2 = 1 - e^{\frac{-(2^{R_2}-1)\sigma_{nRD}^2}{\sigma_{RD}^2 P_R}}. \quad (5.109)$$

Burada  $p_{RD}^1$  röle yalnızca  $T_1$ 'in bilgi işaretini iletirken,  $p_{RD}^2$  ise yalnızca  $T_2$ 'nin bilgi işaretini iletirken röle – hedef arası kanalda servis dışı kalma olasılığını göstermektedir.

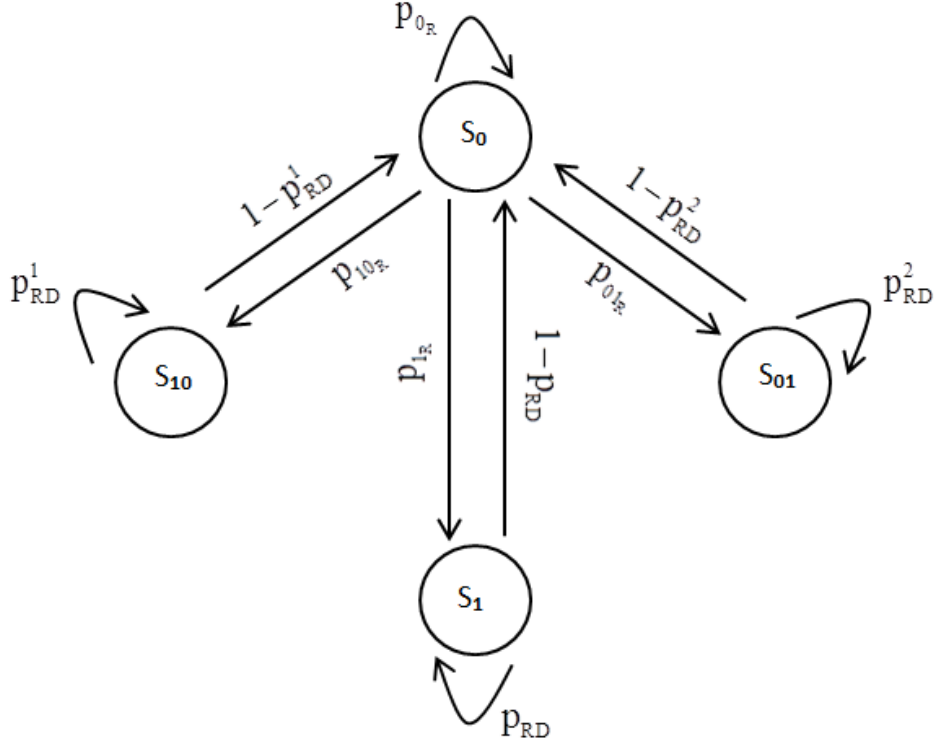
Şekil 5.8'de verilen Markov zinciri uyarınca sistem belleğinin  $S_0$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{01}$  ve  $S_1$  durumlarında olma olasılıkları

$$p(S_0) = p_{0_R} p(S_0) + (1 - p_{RD}^1) p(S_{10}) + (1 - p_{RD}^2) p(S_{01}) + (1 - p_{RD}) p(S_1), \quad (5.110)$$

$$p(S_{10}) = p_{10_R} p(S_0) + p_{RD}^1 p(S_{10}), \quad (5.111)$$

$$p(S_{01}) = p_{01_R} p(S_0) + p_{RD}^2 p(S_{01}), \quad (5.112)$$

$$p(S_1) = p_{1_R} p(S_0) + p_{RD} p(S_1) \quad (5.113)$$



**Şekil 5.8 :** Protokol – 6 için Markov zinciri.

olup (5.110-5.113) denklemlerinden sistemin her bir bellek durumunda bulunma olasılıkları  $p(S_0)$  cinsinden

$$p(S_{10}) = \frac{p_{10_R}}{1 - p_{RD}^1} p(S_0), \quad (5.114)$$

$$p(S_{01}) = \frac{p_{01_R}}{1 - p_{RD}^2} p(S_0), \quad (5.115)$$

$$p(S_1) = \frac{p_{1_R}}{1 - p_{RD}} p(S_0) \quad (5.116)$$

olarak yazılır. Sistemin bu bellek durumlarından herhangi birinde bulunması gerektiği yani (5.101) koşulu altında her bir bellek durumunun ortaya çıkma olasılığı hesaplanabilir. Sonuç olarak sistemin bit iletim verimliliği (4.7)'ye göre:

$$\eta = R_1 p(S_{10})(1 - p_{RD}^1) + R_2 p(S_{10})(1 - p_{RD}^1) p_{01_D} + R_2 p(S_{01})(1 - p_{RD}^2) + R_1 p(S_{01})(1 - p_{RD}^2) p_{10_D} + p(S_1)(R_1 + R_2)(1 - p_{RD}) \quad (5.117)$$

olarak hesaplanır. (5.117) düzenlenirse

$$\eta = R_1 \left( p(S_{10})(1 - p_{RD}^1) + p(S_{01})(1 - p_{RD}^2) p_{10_D} \right) + R_2 \left( p(S_{01})(1 - p_{RD}^2) + p(S_{10})(1 - p_{RD}^1) p_{01_D} \right) + p(S_1)(R_1 + R_2)(1 - p_{RD}) \quad (5.118)$$

şeklinde verilebilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta sistem tasarımı dolayısıyla bir çevrimlik iletişim sonunda rölenin yalnızca  $T_1$ 'in, yalnızca  $T_2$ 'nin ya da  $T_1$  ve  $T_2$ 'nin işaretlerini birlikte iletme durumlarının olmasıdır. Bu nedenle bit iletim verimliliği hesaplarına; röle üzerinden yalnızca  $T_1$ 'in bilgi işaretinin hedefe iletildiği durumda  $T_2$ -D doğrudan iletişim hattı üzerinden ikinci kaynak biriminin işaretinin hedefe doğru aktarılmış olma olasılığının, yalnızca  $T_2$ 'nin bilgi işaretinin hedefe iletildiği durumda ise  $T_1$ -D hattı üzerinden ilk kaynak biriminin işaretinin hedefe doğru aktarılmış olma olasılığının dahil edilmesi gerekir. Röle üzerinden her iki kaynağın bilgi işaretinin başarılı bir şekilde iletildiği durumda;  $T_1$ -R-D,  $T_2$ -R-D iletim kanallarından aktarılan bilgi  $T_1$ -D ve  $T_2$ -D arasındaki hıza üst sınır teşkil ettiği için kaynak – hedef arası işaretleşme göz ardı edilebilir.

(4.10)'a göre sistem sığası Protokol – 2, 3 ve 5'teki gibi  $(R_1 + R_2)/2$  olarak verilir. Sistem sığasının tanımı gereği yeterince yüksek SNR değerleri için ilk zaman aralığı sonunda röle, kaynak işaretlerini hatasız bir şekilde alır ve hedefe iletir. Hedef de ikinci zaman aralığı sonunda rölenin aktardığı  $R_1 + R_2$  hızındaki ortak  $T_1, T_2$  işaretini doğru olarak alır. Sonuç olarak iki zaman aralığı sonunda  $R_1 + R_2$ 'lik bir iletim hızı elde edilmesine bağlı olarak sistemin  $(R_1 + R_2)/2$ 'lik sığaya ulaşılacağı söylenebilir. Aynı yorum Şekil 5.8'deki Markov zinciri ve yeterince yüksek SNR değerleri için kanalların servis dışı kalma olasılıklarının sıfıra yakınsayacağı bilgisi kullanılarak tüm bellek geçişlerinin  $S_0, S_1$  arasında olacağı ( $p(S_0)=1/2, p(S_1)=1/2$ ) ve  $S_1$  bellek durumunda  $R_1 + R_2$ 'lik hız elde edileceği bilgisiyle de ulaşılabilir.

### 5.2.5.2 Enerji verimliliği

Şekil 5.8'de verilen yapının dört durumlu bellek geçişlerine sahip olduğu görülmektedir. Ortalama enerji tüketimi (4.8)'e göre Protokol – 5 ile benzer olup

(5.103)'deki gibi verilebilir.  $E(S_i)$  her bir bellek durumunda harcanan ortalama enerji miktarı (4.9) kullanılarak

$$E(S_0) = \frac{P_1 + P_2}{1 - p_{0R}}, \quad (5.119)$$

$$E(S_{10}) = \frac{P_R}{1 - p_{RD}^1}, \quad (5.120)$$

$$E(S_{01}) = \frac{P_R}{1 - p_{RD}^2}, \quad (5.121)$$

$$E(S_1) = \frac{2P_R}{1 - p_{RD}} \quad (5.122)$$

şeklinde verilir.

### 5.3 Serbest Uzak Yol Kaybının Sistem Başarımına Etkisi

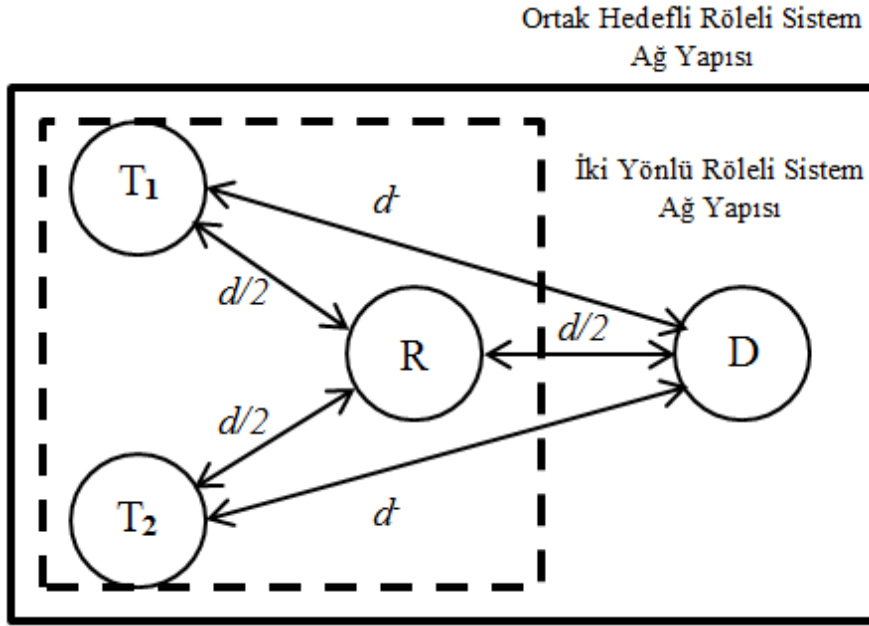
Bölüm 4'te incelenen iletişim yapıları ve sunulan başarımların sonuçları Rayleigh sönümlenmeli ve birim değışintili ( $h_{ij} \sim CN(0,1)$ ) kanal katsayıları için verilmiş olmasına karşın, Bölüm 5'te önerilen protokoller ve servis dışı kalma olasılıkları Rayleigh sönümlenmeli kanalların herhangi bir değışinti değeriine sahip olduğu ( $h_{ij} \sim CN(0, \sigma_{ij}^2)$ ) duruma genelleştirilmiştir.

Önerilen tüm protokoller için başarımların sonuçları Bölüm 5.5'te birim değışintili kanallar altında verilmiş olmasına karşın, Bölüm 4'te verilen sistemlerle daha adil bir karşılaştırma yapabilmek adına serbest uzak yol kaybının sistem başarımı üzerine etkisi irdelenebilir. Bu bağlamda, Bölüm 5.3.1'de Bölüm 4'te verilenle 5'te önerilen protokollerin başarımları serbest uzak yol kaybı dikkate alındığı durumda karşılaştırılmıştır. Bölüm 5.3.2'de ise röle konumunun ortak hedefli röleli sistem başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

#### 5.3.1 Yaklaşım 1 – iki yönlü ve ortak hedefli röleli sistemler

Ortak hedefli röleli sistem yapısının iki yönlü röleli sistem yapısına indirgenebileceği literatürdeki çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. [10-11, 20]'de verilen iki yönlü röleli

sistemler ve bu tez çalışması kapsamında incelenen ortak hedefli röleli sistemler için ölçeklenmiş uzaklık değerleri Şekil 5.9’da verilmiştir.



**Şekil 5.9 :** Genelleştirilmiş iletişim sistemi düğüm uzaklıkları.

Şekil 5.9’da dikkat edilmesi gereken nokta  $T_1$ -R,  $T_2$ -R ve R-D arası uzaklıkların  $d/2$  olduğu durumda  $T_1$ -D ve  $T_2$ -D uzaklıklarının  $d$ ’ye soldan yakınsayabileceğidir. Bu bölümde yapılan analizlerde bu iki uzaklığın  $d$ ’ye eşit olduğu varsayımında bulunulmuştur. [10-11]’de incelenen ve Bölüm 4’te de verilen sistemler için  $T_1$  kaynağı bilgi işaretlerini  $d$  uzaklıktaki (doğrudan iletişim kuramadığı, yalnızca röle üzerinden iletişim sağlayabildiği)  $T_2$  hedefine  $T_1$ -R (uzaklık:  $d/2$ ), R- $T_2$  (uzaklık:  $d/2$ ) iletişim kanalları üzerinden iletmektedir. Bölüm 5’te önerilen sistemler içinse  $T_1$  kaynağı bilgi işaretlerini  $d$  uzaklığındaki hedefe doğrudan  $T_1$ -D kanalı üzerinden ya da  $T_1$ -R (uzaklık:  $d/2$ ), R-D (uzaklık:  $d/2$ ) iletişim kanalları üzerinden iletmektedir. Ortak hedefli röleli sistemlerin iki yönlü röleli sistemlere göre başarımlar anlamında birer temel noksanlık ve üstünlüğünden bahsedilebilir. Bunlar; rölenin  $2R$  hızlı gönderdiği işaretin hedef tarafından yine  $2R$  hızlı olarak çözülmesi gerekliliği ve her bir kaynağın hedefle iletişim sağlayabilmek için iki farklı alternatifte sahip olması olarak gösterilebilir. Rölenin  $2R$  hızla iletim yapma ihtiyacını açacak olursak; [10-11]’de  $T_1$ ,  $T_2$  röle üzerinden aldığı  $2R$  hızlı işareten kendi işaretini mutlak doğrulukta çıkarabilirken, ortak hedefli sistemde herhangi bir kaynağın bilgi işaretleri mutlak doğrulukta bilinmediği için hedef aldığı işaretleri  $2R$  hızlı olarak çözmek zorundadır. Kaynağın iki farklı alternatifte sahip olması ise  $T_1$ ,  $T_2$

kaynaklarının işaretlerini  $T_1$ -D,  $T_2$ -D ve  $T_1$ -R-D,  $T_2$ -R-D kanalları üzerinden iletebilme şansının var olmasıdır.

Bu bölümde yapılan ve Bölüm 5.5'te sonuçları verilen serbest uzay yol kaybı yaklaşımı [10]'da verildiği gibi kullanılmış olup  $\sigma_{ij}^2$   $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki kanal sönümleme katsayısının değışintisini göstermek üzere aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\sigma_{ij}^2 = k_{ij}^{-a} \sigma^2. \quad (5.123)$$

Burada  $\sigma^2$  tüm kanallar için normalize değışinti değeri,  $a$  ise serbest uzay yol kaybı katsayısıdır.  $k_{ij}$  normalize uzaklık katsayısıdır ve  $d_{ij}$   $i, j$  düğümleri arasındaki uzaklık olmak üzere

$$k_{ij} = \frac{d_{ij}}{d} \quad (5.124)$$

şeklinde verilir.

### 5.3.2 Yaklaşım 2 – röle konumunun sistem başarımına etkisi

Serbest uzay yol kaybının sistem başarımına diğeri bir etkisi röle konumunun optimizasyonu ile ilgilidir. Şekil 5.10'da verilen genelleştirilmiş iletişim sistemi için röle konumunun kaynakların durum ve ihtiyaçlarına, kullanılan protokole göre belirlenebilmesi sistem başarımına olumlu yönde etki etmektedir.

Bu bölümde ele alınan serbest uzay yol kaybı etkisi  $d_x$ ,  $d_y$  ve  $d$  uzaklık değışkenlerince belirlenmekte olup, (5.123-5.124) eşitlikleri kanal değışintisi hesapları için geçerlidir. Adil kullanım sağlanabilmesi amacıyla  $T_1$ ,  $T_2$  kaynaklarına eşit uzaklıkta ele alınan rölenin hedef ve kaynaklara olan uzaklığı  $\phi$  açısıyla belirlenmekte olup Şekil 5.10'da

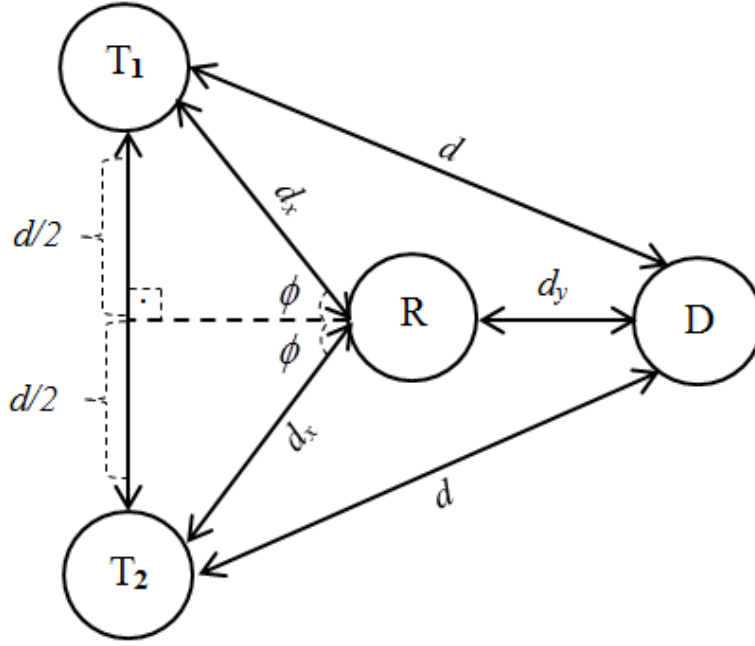
$$d_x = \frac{d}{2 \sin \phi}, \quad (5.125)$$

$$d_y = \frac{d}{2} (\sqrt{3} - \cot \phi) \quad (5.126)$$

eşitlikleri geçerlidir. Ayrıca etkin bir röle kullanımı için R'nin  $T_1$ - $T_2$ -D üçgensel alanın içerisinde kaldığı (ya da bu alan içerisindeki bir rölenin seçildiği) varsayımı yapılmıştır ve böylece  $\phi$  için

$$30^\circ < \phi < 90^\circ \quad (5.127)$$

ilişkisi geçerlidir.



Şekil 5.10 : Ortak hedefli röleli sistemlerde rölenin konumlandırılması.

#### 5.4 Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, Bölüm 5.1 ve Bölüm 5.2’de sırasıyla, ayrık – zamanlı ve eş – zamanlı iletişim için önerilen protokollerin başarımları kuramsal çıkarımlarla ve benzetim sonuçlarıyla değerlendirilmiş olup, Bölüm 4’te [10-11] tarafından önerilmiş olan protokollerle çeşitli koşullar altında karşılaştırılmıştır. Ayrıca röle konumunun Protokol – 1-6’nın başarımına etkisi ve hedefin bilgi işaretlerini röle ve kaynaktan iki farklı yolla alması nedeniyle mümkün olan, alıcıda en büyük oran birleştirmesi yapılması halinde sistemlerin başarımları bu bölümün kapsamındadır.

Aksi belirtilmedikçe eğriler kuramsal olarak verilmiş olup, her bir protokol için mutlaka benzetim sonuçlarıyla desteklenmiştir. Benzetim sonuçları için Monte Carlo tekniği kullanılmış ve her kanaldaki servis dışı kalma olasılıkları için iterasyon sayısı

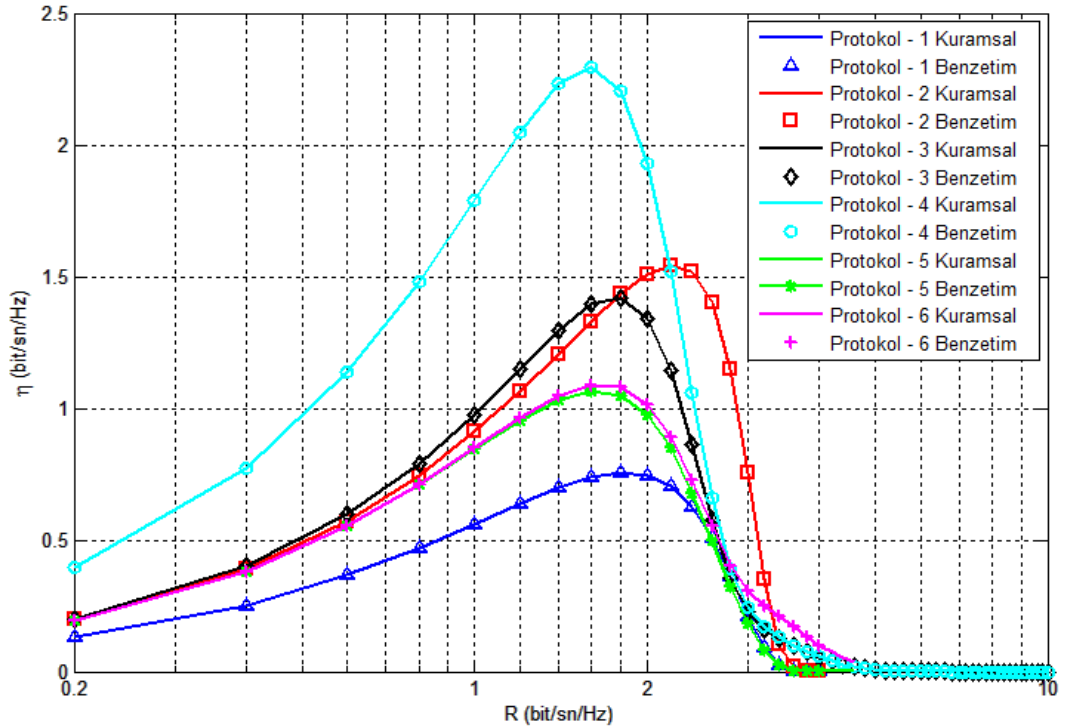
$N_{ij}$

$$N_{ij} = \frac{100}{p_{ij}} \quad (5.128)$$

olarak kullanılmıştır. (5.128)'deki  $p_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki kanalın kuramsal servis dışı kalma olasılığını göstermektedir.

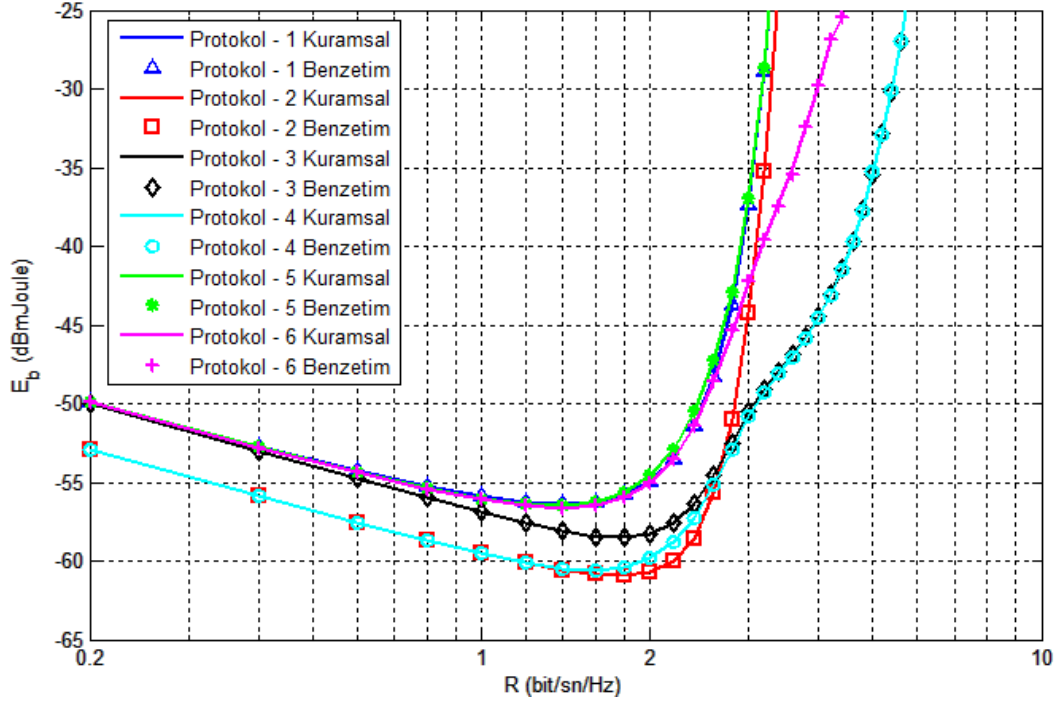
Sistem kaynaklarının adil kullanımı adına benzetim sonuçları, her kullanıcının aynı  $R$  hızı ve aynı  $P$  gücüyle iletim yaptığı varsayımı altında bulunulmuştur. Benzer şekilde  $T_1$  ve  $T_2$  kullanıcılarının röle ile aralarındaki kanal katsayıları  $h_{1R}$ ,  $h_{2R}$  ve hedefle aralarındaki kanal katsayıları  $h_{1D}$ ,  $h_{2D}$  aynı dağılımlı ve değişintili, alıcı girişlerindeki gürültüler de eş güçlü alınmıştır.

İlk olarak Protokol – 1-6'nın kuramsal ve benzetim sonuçlarının karşılaştırması Şekil 5.11'de verilmiştir. SNR=10 dB, kanal sönmleme katsayılarının eş ve birim güçlü,  $h_{ij} \sim CN(0,1)$ , olduğu durum için bit iletim verimliliğinin  $R$ 'ye bağlı değişimi incelendiğinde tüm protokoller için kuramsal sonuçlarla benzetim sonuçlarının birebir örtüştüğü Şekil 5.11'e bakarak rahatlıkla gözlemlenebilir.



Şekil 5.11 : Ortak hedefli röleli sistem protokolleri için bit iletim verimliliği, SNR=10 dB.

Benzer şekilde enerji verimliliğinin  $R$ 'ye bağlı değişimi SNR=10 dB için Şekil 5.12'de verilmiştir. Yine görüleceği üzere her bir protokol için kuramsal sonuçlar benzetim sonuçlarıyla örtüşmektedir.



**Şekil 5.12 :** Ortak hedefli röleli sistem protokolleri için enerji verimliliği, SNR=10 dB.

Normalize bit iletim verimliliği bit iletim verimliliğinin bir fonksiyonu olduğu ( $\eta_{norm} = \eta / R$ ) ve farklı bir bilgi içermediği için kuramsal ve benzetim sonuçlarının karşılaştırması tekrardan verilmemiştir.

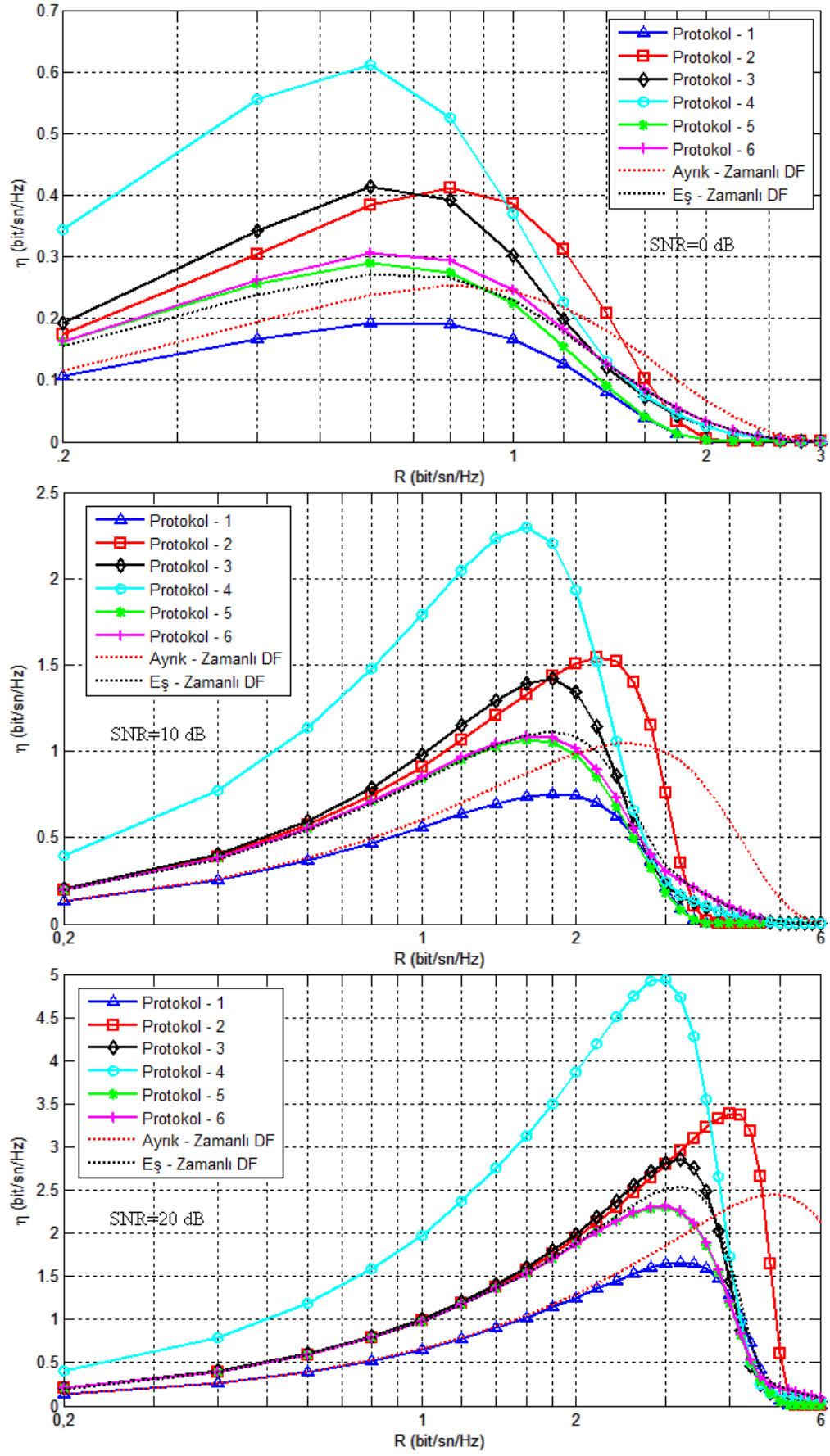
İkinci olarak Protokol – 1-6'nın Bölüm 4.1-4.2'de incelenen Ayrık – Zamanlı ve Eş – Zamanlı DF sistemler ile karşılaştırması serbest uzay yol kaybının dikkate alınmadığı durum için yapılmıştır.

Şekil 5.13-5.16'da sistemlerin başarımları;  $R$ 'ye bağlı olarak bit iletim verimliliği,  $R$  ve SNR'a bağlı olarak normalize bit iletim verimliliği,  $R$ 'ye bağlı enerji verimliliği şeklinde verilmiştir.

Şekil 5.13'te verilen bit iletim verimliliği eğrilerini yorumlamadan önce sistemlerin iletim sığalarını yorumlamak faydalı olacaktır. Protokol – 1 ve 2 yapısal olarak kaynak birimlerin farklı zaman birimlerinde aktarım yapmasına dayanmaktadır. Protokol – 1, bilgi işaretlerinin hem kaynak hem de röle üzerinden doğru olarak alınmasını öngören bir yapıda olup herhangi bir  $R$  iletim hızı için SNR'ın yeterince

büyük değerlerinde bir çevrimlik iletişim üç zaman aralığı sonunda sağlanır. Başka bir deyişle iki kaynağın  $R$  hızıyla yaptığı iletim sonucunda  $2R$  (bit/Hz)'lik sistem hızına üç zaman aralığı sonunda ulaşılır. Bu nedenle de sistem hızının  $0,6\bar{R}$  (bit/sn/Hz) olduğundan söz edilebilir. Protokol – 2 ise kaynak bilgi işaretlerinin röle veya kaynak birimler üzerinden en hızlı ve başarılı bir şekilde alınmasını hedefler. Ayrı  $R$  hızında iletim yapıldığı durumda  $2R$ 'lik sistem hızına iki zaman aralığı sonunda (her iki kaynağın birer zaman aralığında iletim yapması ve hedef tarafından doğru alınması) yeterince büyük SNR değerleri için ulaşılabilir ve sistem sıgası  $R$  şeklinde verilir. Kaynakların eş – zamanlı iletimde bulunduğu Protokol – 3-6'da ise birinci zaman aralığında her iki kaynak iletimde bulunurken ikinci zaman aralığında röle aktarımda bulunmaktadır. Protokol – 5 ve 6 hedefin ARQ uygulamadığı ve röleli bir iletişimin esas alındığı yapıda olduğu için alınan işaretler hedef birimce kestirilmeden önce röle aktarımı mutlak şekilde beklenmektedir. Bu bilgiler ışığında iki zaman aralığı sonunda (kaynakların iletimde bulunduğu birinci zaman aralığı ve rölenin iletimde bulunduğu ikinci zaman aralığı)  $2R$ 'lik iletim sıgasına ulaşmak mümkündür ve sistem hızının en büyük değeri için  $R$  hızından bahsedilebilir. Protokol – 3 ve 4 hedef birimin ARQ uyguladığı durum için tasarlanmıştır. Bunlardan Protokol – 3 bilgi işaretlerinin güvenilirliğine dayandırıldığı için bir çevrimlik iletişim sonucunda hedef birimlerin yanında röle aktarımının da mutlak şekilde sağlanması beklenmektedir. Bu nedenle Protokol – 5 ve 6 için yapılan en büyük iletim hızı yaklaşımı Protokol – 3 için de geçerlidir. Protokol – 4 ise diğer eş – zamanlı iletişim protokollerinin aksine kaynakların aynı anda iletim yapabilmesi ve hedefin ARQ uygulayabilmesi yardımıyla bir zaman aralığında yapılan iletişim sonunda hedefe  $2R$ 'lik bilgi aktarımının doğru bir şekilde yapılmasını güvence altına alabilmektedir. Sonuç olarak da iletim hızının en büyük değerinin  $2R$  olduğundan bahsedilebilir. Tüm bu bilgiler ışığında her bir protokolün bit iletim hızlarını yorumlayacak olursak her  $R$  hızı için SNR yeterince yüksek tutulursa Protokol – 4'ün en iyi Protokol – 1'in en kötü başarımı sağlayacağından söz edilebilir.

Şekil 5.13'te tüm kanallardaki SNR değerlerinin eşit ve  $\bar{\gamma}$  alındığı durumda  $SNR=0$ , 10 ve 20 dB değerleri için her bir protokolün bit iletim verimlilikleri verilmiştir. Serbest uzay yol kaybının dikkate alınmadığı bu durum için her kanaldaki sönmüleme katsayıları eş ve birim güçlü,  $h_{ij} \sim CN(0,1)$  olarak alınmıştır.



Şekil 5.13 : Bit iletim verimliliği.

Sonuçlardan görüldüğü ve yukarıdaki paragrafta da yorumlandığı üzere her üç SNR değeri için de en büyük bit iletim verimliliğini Protokol – 4, en düşüğünüyse Protokol – 1 sağlamaktadır. Protokol – 2, 3, 5 ve 6’nın kuramsal iletim verimliliği sınırları aynı olsa da yapısal farklılıkları dolayısıyla aynı SNR değeri için sağlayabildikleri en büyük bit iletim verimliliklerinde farklılıklar vardır. Şekil 5.13’ten görüldüğü üzere SNR=10 ve 20 dB için bu sistemlerin içerisinde en büyük bit iletim verimliliğini Protokol – 2 sağlamaktadır. Çünkü iletim hızı  $R$  olan tüm bu sistemler içerisinde Protokol – 3, 5 ve 6’da kaynaklar iletim ortamını aynı anda kullanmakta, bu nedenle röle ve hedefte kaynak işaretleri birbirlerine girişim uygulayarak servis dışı kalma olasılıklarını arttırmaktadır. Protokol – 2’de ise kaynaklar farklı zaman aralıklarında iletim yapmakta, dolayısıyla bu yönde bir bozucu etki söz konusu olmamaktadır. Öte yandan Protokol – 3 üzerindeki avantajını SNR=0 ve 10 dB için düşük  $R$  değerlerinde koruyamamaktadır; çünkü sistem karmaşıklığını düşük tutmak adına, Protokol – 2 röle katkısını yalnızca aynı çevrim içerisinde her iki kaynak da hedefe başarılı aktarımda bulunamaz ve röleye bulunabilirse sağlamaktadır. Bu durum da rölenin yeterince etkin kullanılamamasına yol açmakta, bu durumun ortaya çıkma olasılığının arttığı düşük SNR ve yüksek  $R$  durumlarında sistem başarımını olumsuz etkilemektedir. Protokol – 3, Protokol – 5 ve 6’dan daha yüksek başarımlar göstermektedir. Çünkü hedef ile kaynak arasında doğrudan iletişimin olduğu durumda hedefin yapmış olduğu geri bildirim, rölenin yapacağından daha değerlidir. Şöyle ki; rölenin herhangi bir mesajı yeniden istemesi (röle ile kaynaklar arası iletişim) sistemin bit iletim verimliliğini doğrudan düşürmektedir. Röle – kaynak arası işaretleşme ara bir faz olup bu fazdaki tekrar sayısının artması bit iletim verimliliğini daha fazla düşürür. Öte yandan hedefin herhangi bir mesajı yeniden istemesi her iki kaynağın tekrar işaret göndermesi (işareti doğru aktarılmış olan için yeni, hatalı aktarılmış olan için aynı işaret) anlamına gelir. Kaynak – hedef arası işaretleşme ana faz olup bu işaretleşme sonunda hedefin doğru bir kestirimde bulunması söz konusudur. Dolayısıyla da rölenin ARQ yapmasına göre genel sistem başarımına daha fazla katkı yaptığından bahsedilebilir.

Önerilen protokollerle ilgili ikinci bir yorumsa eş – zamanlı iletişim protokollerinin ayrık – zamanlı olanlara göre artan  $R$  ile birlikte daha erken yıkıma uğradığı olabilir. Bu sonucun oluşmasındaki temel neden ise iletim hızı  $R$ ’nin artması eş – zamanlı iletimde bulunan kaynakların birbirlerinin işareti üzerindeki bozucu etkisinin artması

olarak belirtilebilir.  $M$  düzeyli modülasyonlu sistemler için ayrık – zamanlı sistemlerde röle ve hedef karmaşıklığı  $M$ , eş – zamanlı sistemlerde ise  $M^2$  olduğu bilgisi ışığında bu yargıda bulunulabilir. Buna karşın ayrık – zamanlı sistemlerin bu avantajını Protokol – 1 için gözlemek mümkün değildir; çünkü güvenilirlik odaklı bir sistem olan Protokol – 1 her iletişim çevrimi için röle – hedef arası iletişimin başarılı olmasına ihtiyaç duymaktadır ve rölenin  $2R$  hızlı aktarımı bu avantajın ortadan kalkmasına neden olmaktadır.

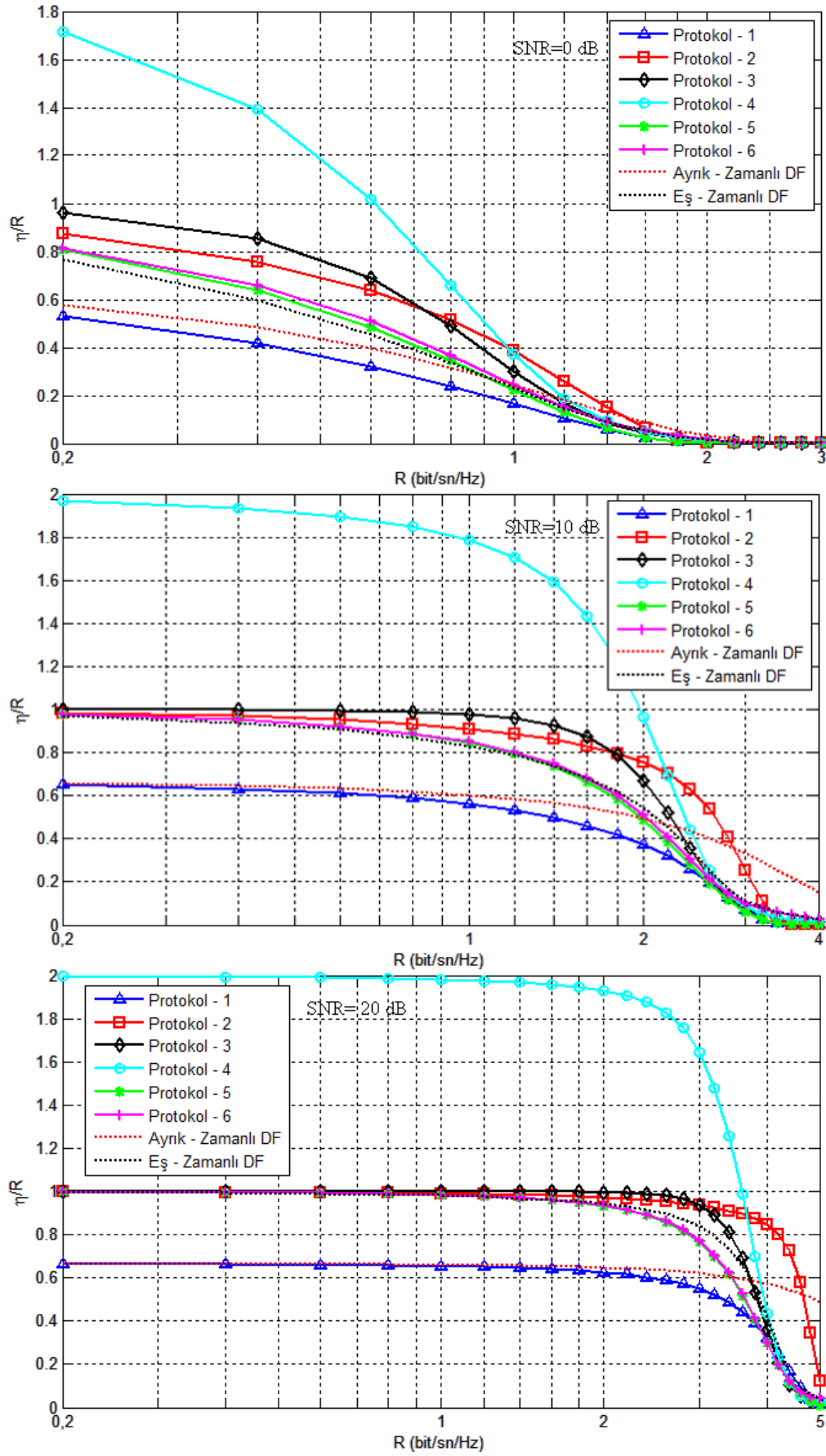
Şekil 5.13'e yönelik başka bir yaklaşım ise Bölüm 4'te incelenen ayrık ve eş – zamanlı iki yönlü röleli sistemlerin Protokol – 1-6 ile olan başarımlarını karşılaştırmaları olabilir. Bölüm 4'te verilen Eş – Zamanlı DF sisteminin en büyük bit iletim hızının  $R$ , Ayrık – Zamanlı DF sistemininse  $0,6\bar{R}$  olduğundan bahsetmiştik. Dolayısıyla, yeterince yüksek SNR değerleri için Protokol – 4'ün her iki sistemden daha yüksek başarımlar sağlayabileceği kolaylıkla öngörülebilir. Protokol – 2'nin en büyük bit iletim verimliliği Ayrık – Zamanlı DF sistemine göre daha yüksektir ve bu nedenle yeterince yüksek SNR değerlerinde daha iyi başarımlar gösterir. Öte yandan Protokol – 2, Eş – Zamanlı DF sistemine göre daha yüksek sığada olmasa da kaynak birimlerin farklı zaman aralıklarında iletim yapması hem sistem başarımlarını daha yüksek kılmakta hem de başarımların daha yüksek  $R$  değerlerinde kötüleşmesini sağlamaktadır. Aynı SNR değerleri için Protokol – 2'nin Ayrık – Zamanlı DF sistemine göre daha düşük iletim hızlarında kötüleşmesi ise iki şekilde açıklanabilir; ortak bir hedefe iletim yapıyor olması nedeniyle rölenin  $2R$ 'lik hızla aktarımında bulunması (ve hedefin  $2R$ 'lik bilgi işaretini çözmek zorunda olması, iki yönlü röleli sistemlerde aktarım  $2R$  hızında olsa bile uç birimlerin  $R$  hızlı bilgi dizisini çözmeleri) ve Protokol – 2'nin Markov zinciri karmaşıklığının düşük tutulması adına beş bellek durumlu bir yapının kullanılması olarak verilebilir. İkinci yargı açılacak olursa; Protokol – 2 'de röle yalnızca  $T_1$  ve  $T_2$  işaretlerini birlikte doğru bir şekilde alırsa aktarım yapar. Örneğin röle belleğinde  $T_1$  varken  $T_2$ 'nin işaretlenmesi sonucu hedef aldığı işareti doğru çözerse röle belleğindeki  $T_1$  işaretini siler. Bu da sistem sığasını olumsuz etkilemektedir.

Şekil 5.13'e yönelik son bir yorum başarımları birbirine çok yakın olan Protokol – 5 ve 6 üzerine yapılabilir. En büyük bit iletim verimliliği anlamında Protokol – 6'nın çok az daha iyi olduğu görülen sistemlerde artan SNR ile birlikte eğriler çakışmaktadır. Bunun nedeni olarak yeterince yüksek SNR değerleri için her iki

sistemin de Şekil 5.7 ve 5.8'den görüleceği üzere  $S_0$  bellek konumundan  $S_1$  bellek konumuna geçmesidir. İki protokol arasındaki fark Şekil 5.7 ve Şekil 5.8'deki  $S_{01}$ ,  $S_{10}$  bellek durumlarındadır. Protokol – 5 için röle  $S_{10}$  durumunda  $T_2$ 'nin  $S_{01}$  durumunda ise  $T_1$ 'in bilgi işaretini kaynaklardan tekrar isterken Protokol – 6'da herhangi bir yineleme isteğinde bulunmaz ve  $S_{10}$ ,  $S_{01}$  durumlarında almış olduğu  $T_1$ ,  $T_2$  bilgi işaretlerini hedefe aktarır. Yeterince yüksek SNR değerlerinde bu bellek durumlarına geçiş olasılığı sıfıra yakınsayacağı için iki protokolün başarımı eşitlenmektedir. Şekil 5.13'te SNR=0 ve 10 dB değerleri için Protokol 6'nın çok az daha iyi başarımla gösterdiği görülmektedir. Düşük SNR ya da yüksek  $R$  değerlerinde Protokol – 6'nın daha iyi başarımla göstermesinin nedeni, protokol yapısı gereği işaretleme tekrarlarının daha az olması ve Protokol – 5'in aksine rölenin  $2R$  değil  $R$  hızıyla aktarımda bulunabilmesidir. Ayrıca kaynak birimlerin benzer olanaklara sahip olmadığı (farklı kanal sönmömleri, bit iletim hızları) durumlarda Protokol – 6 ile 5 arasındaki başarımla farkının artacağı söylenebilir.

Şekil 5.14-5.15'teki eğriler Şekil 5.13'le aynı ön koşullarda (iletim hızı, kanal yapısı, vs.) elde edilmiştir. Normalize iletim hızı  $R$  ve SNR'a bağılı olarak incelendiğinde her bir sistemin yeteri kadar büyük SNR ya da küçük  $R$  değeri için Şekil 5.13 yorumlarında da belirtilen en büyük bit iletim hızlarına ulaştığı görülmektedir.

Protokol – 4 normalize bit iletim verimliliğini 2 düzeyinde sağlayabilmektedir ve Şekil 5.14'te görüldüğü üzere SNR=20 dB için  $R<2$  değerleri için bu düzeydeki normalize bit iletim verimliliğini yaklaşık olarak korumaktadır. SNR değeri düştükçe en büyük normalize bit iletim verimliliğini yaklaşık koruyabildiği  $R$  değeri azalmakta ve SNR=10 dB için  $R<0.4$  olmaktadır. SNR=0 dB içinse en büyük bit iletim verimliliği korunamamakta ve bit iletim verimliliğinin en büyük değeri 1.7 olmaktadır. Protokol – 2, 3, 5 ve 6 için en büyük normalize bit iletim verimliliği 1 iken Protokol – 1 içinse  $0,6\bar{6}$ 'dır. Ayırık – zamanlı sistemler daha yüksek  $R$  değerleri için başarımlarını koruyabilirken bu durum Protokol – 1 için geçerli değildir. Çünkü Protokol – 1 her iletişim çevriminde röle katkısını mutlak kılmaktadır ve rölenin  $2R$  hızıyla yaptığı iletim hedefle arasındaki servis kesilme olasılığına üstel etki etmektedir. Eş – zamanlı iletişim sistemleri olan Protokol – 3-6 içerisinde system sığasını en uzun süre koruyan Protokol – 3-4 olarak görülmektedir. Protokol – 3-4'ün bu durumunda hedefin ARQ uygulamasının rölenin ARQ uygulamasından daha başarılı bir yöntem olması etkindir. Yeterince yüksek SNR değerleri için

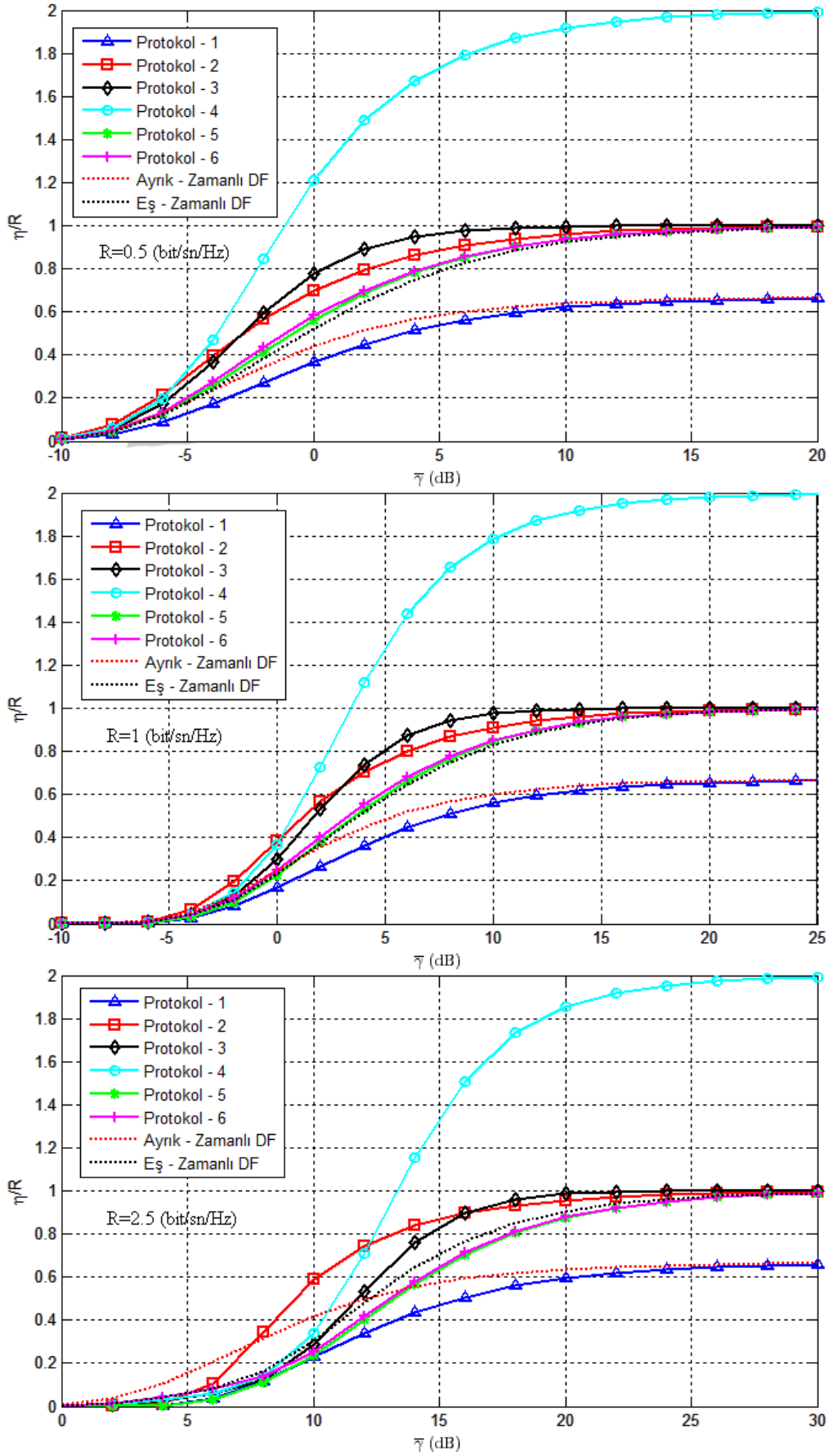


Şekil 5.14 :  $R$ 'ye bağlı normalize bit iletim verimliliği.

(örn; SNR=20 dB) tüm sistemler içerisinde normalize bit iletim verimliliğini en uzun süre koruyan iki yönlü röleli Ayırık – Zamanlı DF sistemidir, çünkü her bir kaynağın farklı zaman aralıklarında iletim yaptığı ve rölenin gönderdiği işaretin  $T_1$  ve  $T_2$  tarafından  $R$  hızlı çözüldüğü sistemde (ayırık – zamanlı Protokol – 1 ve 2 için  $2R$ ) servis kesilme olasılığı  $R$  ile üstel ilişkilidir. Eş – Zamanlı DF sistemi ise eş – zamanlı iletişim temelli Protokol – 3, 5 ve 6 ile benzer başarımlar göstermekte olup SNR= 20 dB için hedefin doğrudan kaynakların iletimi sonucunda doğru kestirimde bulunabildiği Protokol – 3’ten daha kötü, röle katkısını mutlak kılan (ve rölenin iletimi  $2R$  ile üstel ilişkili olan) Protokol – 5 ve 6’dan daha iyidir. Düşük SNR değerlerinde ise (örn; SNR=0 dB) ortak hedefli sistemlerin yapısı nedeniyle hedef birimin röle ve kaynak gibi iki farklı düğüm üzerinden bilgi işaretlerini alıyor olmasının sağladığı çeşitlilik Protokol – 5 ve 6’yı Eş – Zamanlı DF sisteminden daha başarılı kılmaktadır.

Kuramsal olarak SNR’ı arttırmak ile  $R$ ’yi azaltmak aynı sonuca götürdüğü için benzer yorumları Şekil 5.15’te verilen SNR’a bağlı normalize bit iletim verimliliği için de türetmek mümkündür. Protokollerin belirli eşik işaret – gürültü oranları için en büyük normalize bit iletim verimliliklerine ulaştığı Şekil 5.15’ten açıkça görülmektedir. Örneğin;  $R=0.5$  bit/sn/Hz’lik iletim hızı için eş – zamanlı iletişim sistemlerinden olan Protokol – 4, en büyük normalize bit iletim verimliliğine 16 dB’lik bir işaret – gürültü oranında ulaşmaktadır. Benzer şekilde  $R=2.5$  bit/sn/Hz’lik iletim hızında ihtiyaç duyduğu işaret – gürültü oranı 28 dB’dir. Ayırık – zamanlı iletişim yapılarından olan Protokol – 2 içinse bu değerler, 14 ve 24 dB’dir. Bu iki sonuçtan görüleceği üzere artan  $R$  ile birlikte en büyük normalize bit iletim verimliliğine ulaşmak için eş – zamanlı iletişim sistemlerinde gereksinim duyulan SNR artışı ayırık – zamanlı iletişim sistemlerine göre daha fazladır.

İki yönlü röleli yapıdaki Ayırık – Zamanlı DF sistemini daha düşük düzeydeki en büyük normalize bit iletim verimliliği nedeniyle Protokol – 2-6 ile karşılaştırmak doğru değildir. Fakat Şekil 5.15’ten görüldüğü üzere, yüksek hız ve düşük SNR değerlerinde (kaynakların farklı zamanlarda iletim yapmasına bağlı düşük servis dışı kalma olasılıklarından dolayı) diğer sistemlerden iyi başarımlar sağlamaktadır ( $R=2.5$  bit/sn/Hz, SNR<7 dB). Eş – Zamanlı DF sistemi ise Protokol – 3, 5 ve 6 ile aynı düzeyde normalize bit iletim verimliliğine ulaşmaktadır. Başarımı Protokol – 3’ten kötü olsa da artan  $R$  ile birlikte Protokol – 5 ve 6’yı geçmektedir.

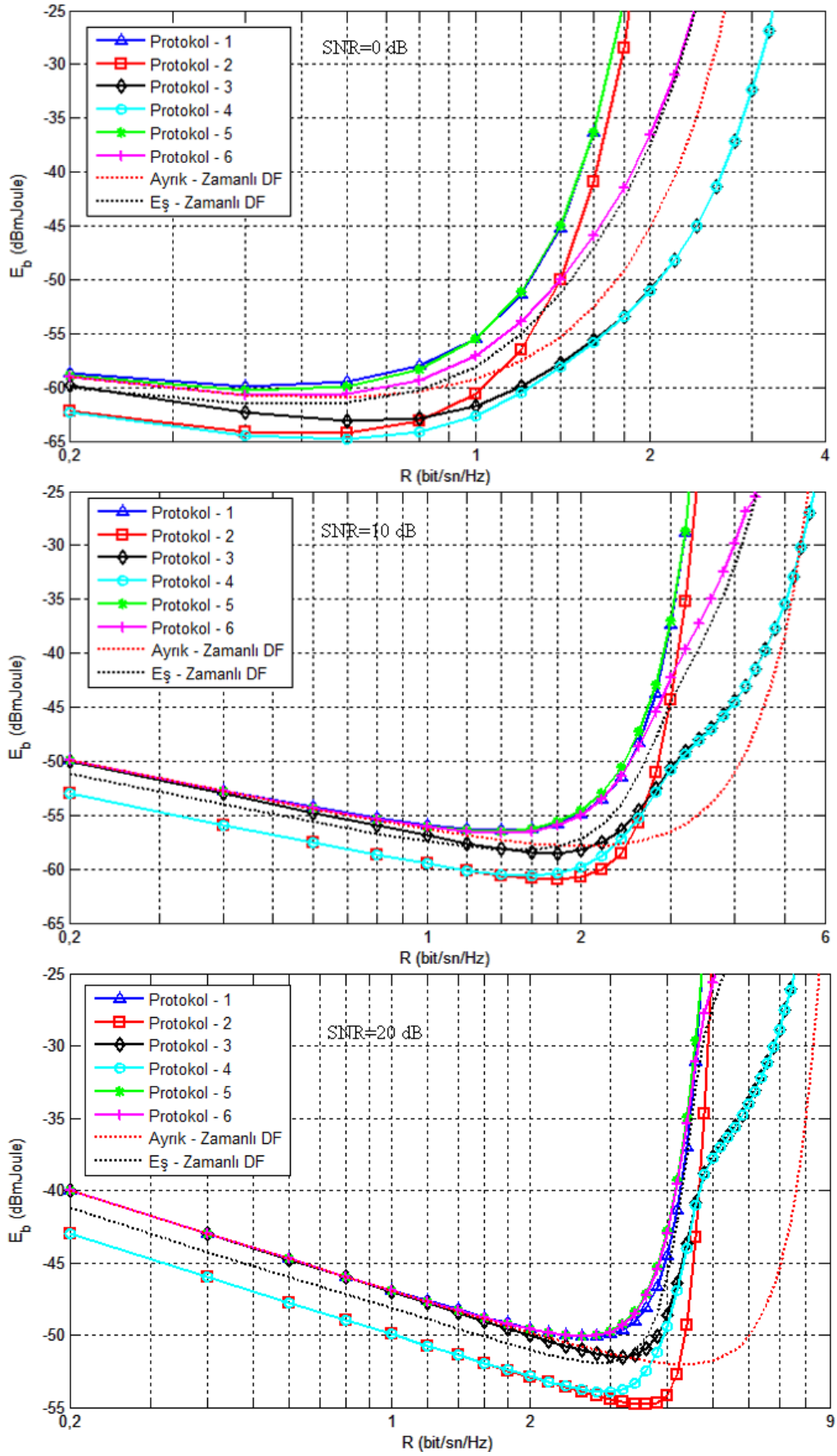


Şekil 5.15 : SNR'a bağlı normalize bit iletim verimliliği.

Şekil 5.16'dan, önerilen protokollerin enerji verimlilikleri incelenecek olursa; her bir protokol için düşük iletim hızlarında daha düşük iletim güçleriyle ( $\bar{\gamma} = P / N_0$  olduğu için daha düşük SNR'larda) yapılan aktarımların,  $R$ 'nin artmasıyla ise daha yüksek iletim güçleriyle yapılan aktarımların harcanan enerji açısından daha verimli olduğu söylenebilir. Çünkü artan  $R$  ile birlikte iletim gücü düşük seviyede kalırsa her bir bellek durumunun tekrarlanma olasılığı yükselecektir. Bu durumu her bir kanal için servis dışı kalma olasılığının SNR ile üstel ters orantılı olmasıyla açıklamak mümkündür.

Protokoller birbirleriyle karşılaştırılacak olursa; SNR=10 dB için  $R < 1$  değerlerinde tüm sistemler yakın başarımlar gösteriyor olmakla birlikte yüksek bit iletim verimliliği sağlayan Protokol – 2 ve 4'ün daha enerji verimlilikli oldukları söylenebilir. Bit iletim verimliliği daha düşük olan Protokol – 1, 5 ve 6 ise en verimsizlerdir. İletim hızı  $R$  arttıkça ise sistemler arasındaki enerji verimliliği farkı belirginleşmektedir. Şöyle ki; SNR=10 dB için  $R > 3$  koşulunda en verimli sistemlerin Protokol – 3 ve 4, en verimsizlerinse Protokol – 1 ve 5 olduğu söylenebilir. Hedefin ARQ uyguladığı sistemlerde doğrudan hedefe aktarım yapılmayan bellek durumu tekrarları olmadığı için genel olarak daha verimlidirler. Rölenin ARQ uyguladığı sistemlerse aksine verimsizdirler. Buna karşın Protokol – 6, hem röle hem de hedefin ARQ uyguladığı Protokol – 1 ve 2'ye göre daha verimlidir. Çünkü Protokol – 6 tasarımı nedeniyle rölenin tek bir kaynağın bilgi işaretinin iletimini (diğer hiçbir protokolda olmayan) mümkün kılmaktadır. Bu durum da röle iletiminde enerji tüketimi anlamında 3 dB'lik fark yaratmaktadır. Ayrıca rölenin tek kaynağın bilgi işaretini ilettiği durumda röle – hedef arası servis dışı kalma olasılığı  $2R$  değil  $R$  ile üstel ilişkilidir ve röle – hedef arası iletimin tekrar olasılığı daha düşüktür ( $S_{11}$  bellek durumu tekrarları).

İki yönlü röleli Ayırık – Zamanlı DF sistemi ise hem röle hem de kaynakların ARQ yaptığı yapıdadır ve her bir zaman aralığında yalnızca  $R$  hızlı iletimin servis dışı kalma olasılığından bahsedildiği için bellek durumlarının tekrarları daha düşük olasılıklıdır. Bu nedenle, yalnızca hedefin ARQ yaptığı ve kaynak – hedef arası iletişim sonunda doğru çözme olayının gerçekleşme olasılığı olan (iki yönlü röleli Eş – Zamanlı DF sisteminde iletişim yalnızca röle üzerinden gerçekleşmek durumunda) Protokol – 3 ve 4 dışında diğer tüm sistemlerden daha yüksek verimliliğe sahiptir. Protokol 3 ve 4 hedef temelli ARQ yapısı ve yüksek normalize



Şekil 5.16 : Enerji verimliliği.

yeterince düşük  $R$  değerleri için Ayrık – Zamanlı DF sisteminden daha verimlidir. Öte yandan SNR arttıkça eş – zamanlı iletişim sistemi olan ve rölede  $2R$  simge karmaşıklığına sahip olan Protokol – 3 ve 4, normalize bit iletim verimliliğini en uzun süre koruyabilen Ayrık – Zamanlı DF sisteminin enerji verimliliği anlamında altında kalmaktadır. Eş – Zamanlı DF sisteminde ise röleye aynı anda iletimde bulunan kaynakların işaretlerinin rölede girişimsel toplamının servis dışı kalma olasılığı söz konusu iken kaynaklarda  $R$  hızlı bilgi işaretinin servis dışı kalma olasılığından bahsedilebilir. Eş – Zamanlı DF sistemi genel olarak Protokol – 6 ile benzer bit başına enerji tüketimine sahip olup biraz az daha verimlidir. Eş – Zamanlı DF hem röle hem de kaynakların ARQ uyguluyor olmasına karşın enerji verimi açısından başarılı bir sistemdir ve yüksek SNR/ $R$  için Protokol – 1, 2 ve 5’ten daha verimlidir. Diğer tüm sistemlerin aksine rölenin iki kaynağın bilgi işaretini aynı anda iletirken (bir kodlama matrisi uyarınca) toplam  $P_R$  gücüyle iletim yapıyor olması bu başarının altında yatan temel nedendir.

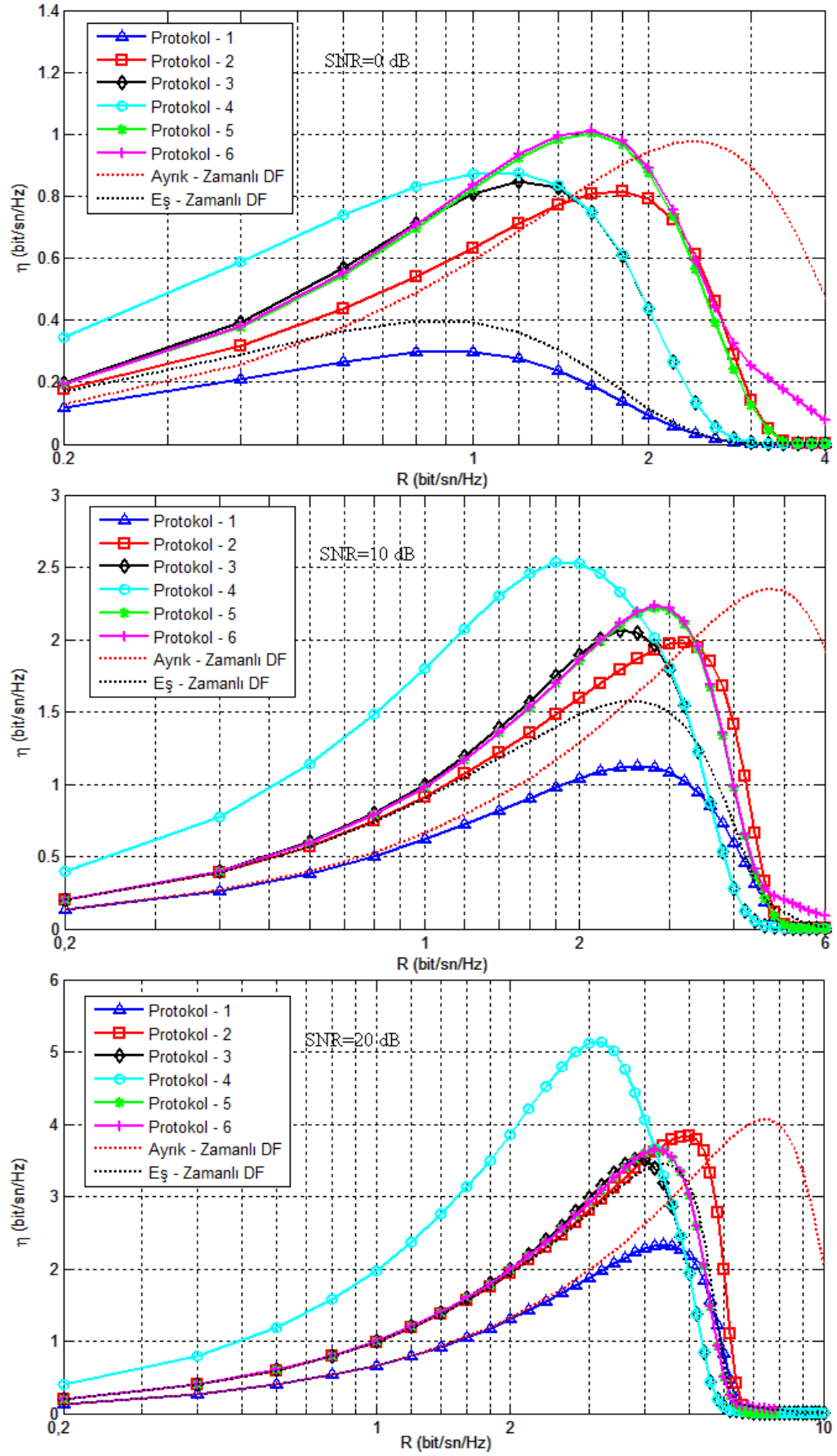
Bu çalışma kapsamında önerilmiş olan protokollerle literatürden derlenmiş olan iki yönlü röleli sistemler karşılaştırılırken iki yönlü röleli sistemlerde noktadan noktaya, bu çalışma kapsamında önerilen ortak hedefli sistemlerde kaynaktan hedefe aktarım yapıldığı unutulmamalıdır. Bu yapısal farklılık nedeniyle ortak hedefli sistemlerde rölenin aktarımda bulunduğu işaretin hedef tarafından hatalı çözülme olasılığı daha yüksektir. Bu durum bit iletim verimliliğini ve özellikle de enerji verimliliğini olumsuz etkilemektedir.

İkinci olarak Bölüm 5.3.1’de verilen serbest uzay yol kaybı yaklaşımı altında iki yönlü röleli Eş – Zamanlı DF, Ayrık – Zamanlı DF ve önerilen Protokol – 1-6 karşılaştırılmıştır. Kaynak düğümlerinin aynı  $R$  hızıyla iletimde bulunduğu ve her bir sistem için kaynak – röle, kaynak – hedef ve röle – hedef arasındaki kanalların eş sönmüleme katsayılarına sahip olduğu durumda şu varsayımlarda bulunulmuştur: Herhangi iki düğüm arasındaki kanallar için  $\gamma_{ij} = \bar{\gamma}$ ’dir. Ayrıca her bir kanal dağılımı  $h_{ij} \sim CN(0, \sigma_{ij}^2)$  olup  $\sigma^2 = 1$ ,  $\alpha = 3.12$  seçilmiştir. Bu bilgiler ışığında her bir kanalın serbest uzay yol kaybına bağlı değişintisi  $\sigma_{ij}^2$  (5.123)’e dayanarak hesaplanmıştır.

Benzetim sonuçlarına geçmeden önce kuramsal beklentileri yorumlayacak olursak; serbest uzay yol kaybının kaynaklar ve hedef arası kanallara göre normalize edildiği

yapıda ( $\sigma_{1D}^2=1, \sigma_{2D}^2=1$ ) protokol başarımlarında baskın etkenin kaynak – hedef arası iletişimin olduğu durumda serbest uzay yol kaybı etkisinin en düşük düzeyde olması, röle kullanımının artmasıyla iyileşmesi beklenebilir. (5.123)’ten faydalanarak  $\sigma_{1R}^2 = 2^{3.12}$ ,  $\sigma_{2R}^2 = 2^{3.12}$ ,  $\sigma_{RD}^2 = 2^{3.12}$  olduğu görülebilir. Kaynakların iletim yaptığı durumda röle girişindeki, röle iletim yaptığında ise hedef girişindeki işaret – gürültü oranı  $\gamma$ ’nın serbest uzay yol kaybı göz önüne alınmadığı duruma göre daha yüksek olduğu görülebilir. Dolayısıyla kaynak – röle ve röle – hedef arasındaki daha az sönmülemeli kanallar sistem başarımlarını yukarıya taşıyacaktır. Sistem başarımının hangi ölçüde iyileşeceği protokolde rölenin nasıl kullanıldığıyla ilişkilidir. Röle katkısının yüksek olduğu protokollerde başarımların yükselişi daha keskin olacakken düşük olduğu durumlarda daha az belirgin olacaktır. Bu bilgiler ışığında Protokol – 2 ve 4 gibi kaynak – hedef arası iletişime dayanan hız odaklı sistemlerin serbest uzay yol kaybı yaklaşımından en az etkileneceği söylenebilir.

Şekil 5.17’de SNR=0, 10 ve 20 dB için bit iletim verimliliğinin serbest uzay yol kaybı altında değişimi  $R$ ’ye bağlı verilmiştir. Yukarıda belirttiğimiz üzere Protokol – 4 için başarımların artışı en düşük düzeyde olup SNR=0, 10 ve 20 dB için en fazla 0.2 bit/sn/Hz düzeyindedir. Benzer şekilde Protokol – 2’nin başarımların artışı 0.4 bit/sn/Hz düzeyindedir. Şekil 5.17 ile ilgili diğer bir çıkarım rölenin ARQ uyguladığı Protokol – 5 ve 6 için gözlenen başarımların artışı hedefin ARQ uyguladığı Protokol – 3’e göre daha fazla olmasıdır. Bu durum da yine rölenin protokoldeki etkinliğiyle ilgilidir. Benzer yorumu daha kısıtlı katkı sağlayacağı yorumuyla (kaynak – hedef arası iletişimde de servis dışı kalmamayı garanti altına aldığı için) Protokol – 1 için de yapmak mümkündür. Şekil 5.17’den görüleceği üzere SNR=0 dB’de Protokol – 5, 6 bit iletim verimliliği en yüksek sistemler olarak görülmektedir. SNR değerinin artmasına bağlı olarak kaynak – hedef arası kanalın iyileştiği durumlardaysa Protokol – 5, 6 bu üstünlüğünü sistem sıfırası en büyük olan Protokol – 4’e kaybetmekle beraber, Protokol – 1 ve 3’e karşı hala üstündür. Son olarak iki yönlü röleli Ayrık – Zamanlı DF ve Eş – Zamanlı DF sistemlerinden bahsedilecek olursa; her iki sistemin başarımlarındaki sıçrama en yüksek düzeydedir. Çünkü bu sistemler doğrudan (ve yalnızca) röle üzerinden iletişim kurmaktadır.



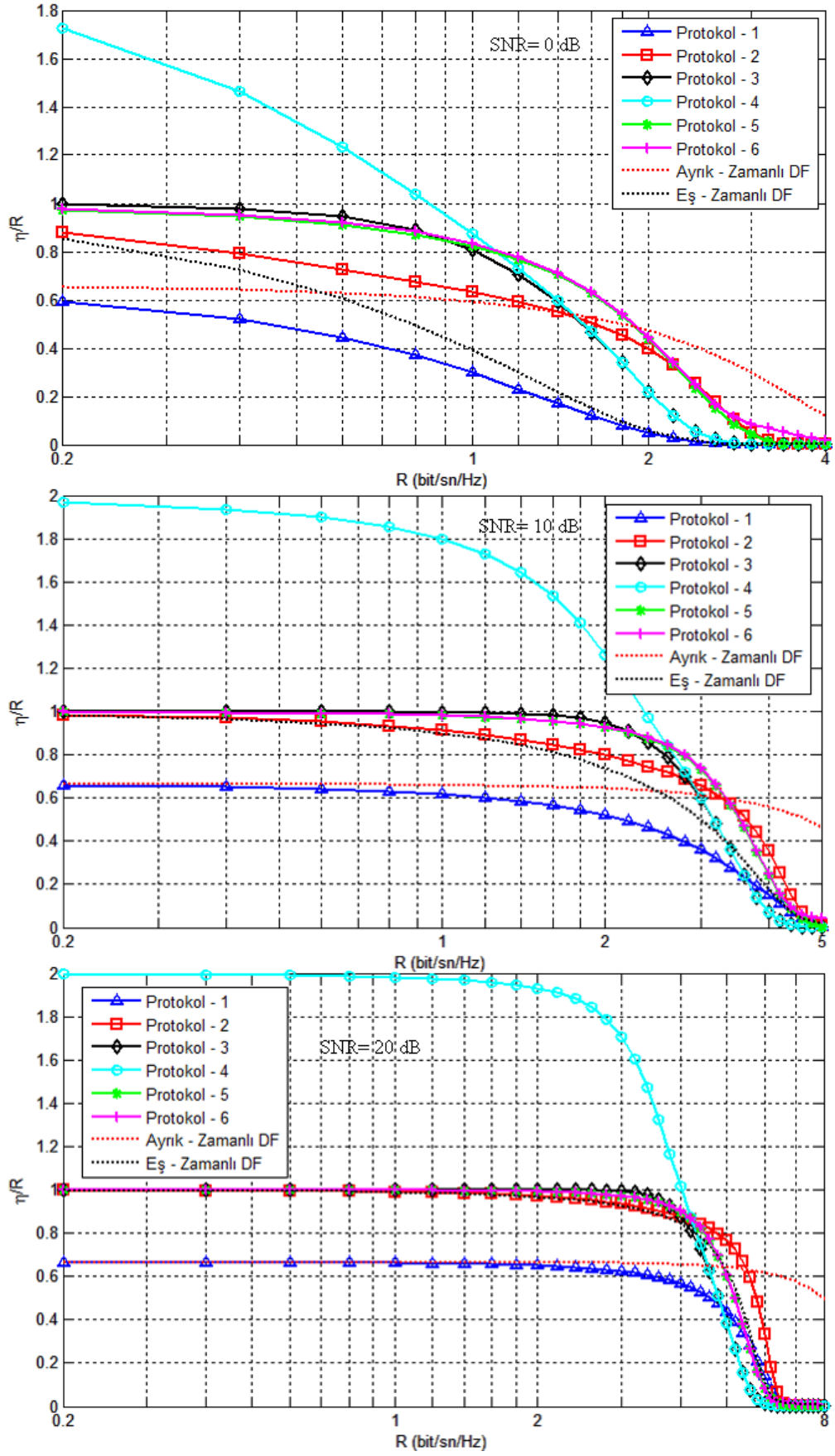
Şekil 5.17 : Serbest uzay yol kaybı altında bit iletim verimliliği.

Buraya kadar literatürdeki [10-11] Eş – Zamanlı ve Ayrık – Zamanlı DF sistemler önerilen altı protokolle hem aynı kanal yapıları hem de serbest uzay yol kaybı yaklaşımı altında karşılaştırılmıştır. Bu farklı yaklaşımlardan çıkarılabilecek ortak sonuç Protokol – 4’ün her iki durumda da en iyi başarımı göstermesidir. Çünkü yeterince yüksek SNR’larda Protokol – 4 tek zaman aralığı kullanımıyla  $2R$ ’lık bilgi işaretini aktarabilecek sığadadır. Öte yandan serbest uzay yol kaybı yaklaşımı altında (Şekil 5.13’te verilen eş zamanlı kanal yapıları durumuna göre) Protokol – 2 ve 3 Ayrık – Zamanlı DF sisteminin altında kalırken (aynı kanal dağılımlarıyla daha iyi başarımlar sağlamasına karşın), Protokol – 5 ve 6 Eş – Zamanlı DF sistemini geçmiştir. SNR değeri azaldıkça yahut  $R$  arttıkça ayrık – zamanlı iletişim sistemlerinin eş – zamanlı iletişim sistemlerini geçtikleri sonucunu Şekil 5-13 ve 5.17’den çıkarmak mümkündür.

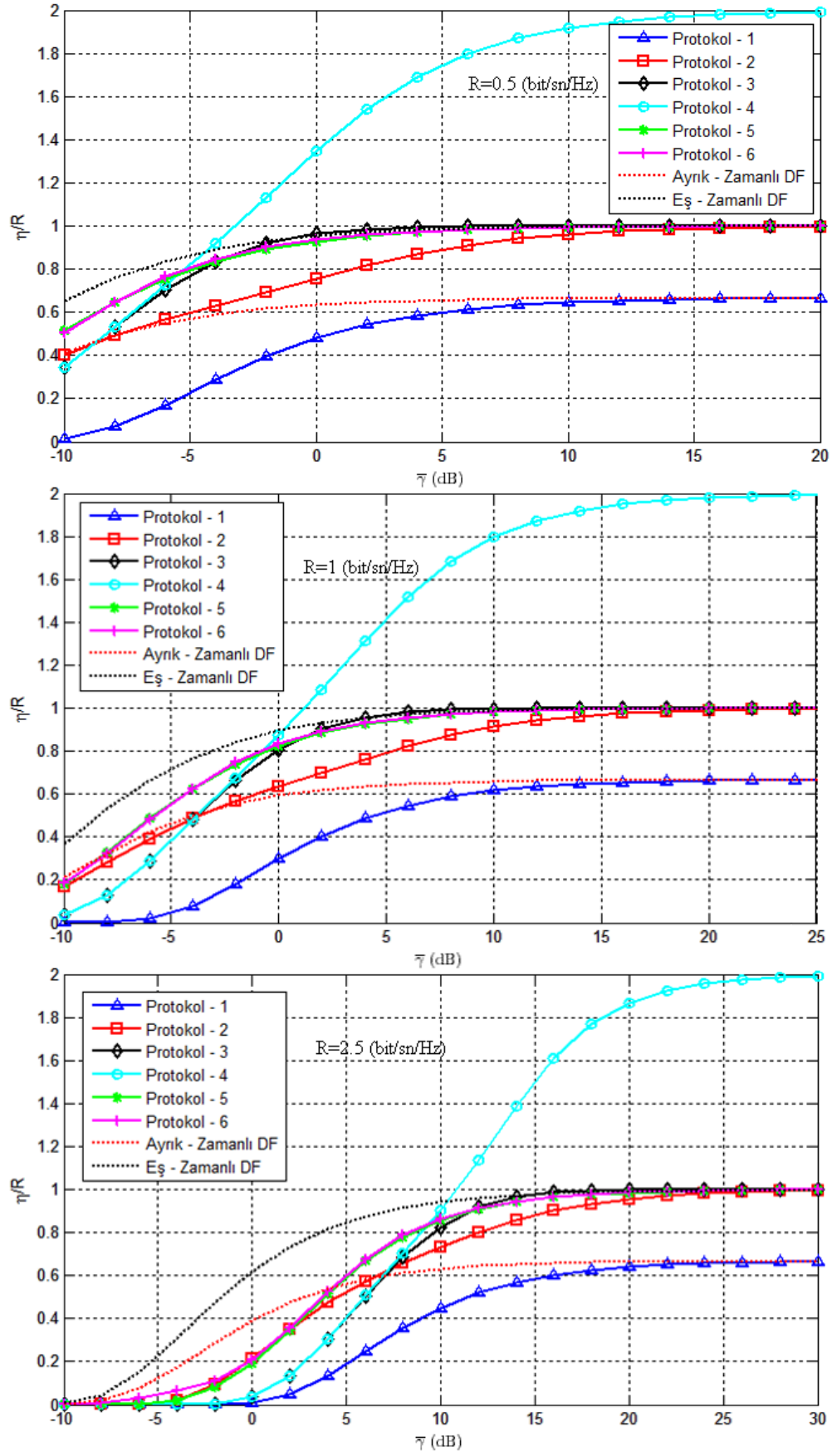
Serbest uzay yol kaybının diğer bir etkisi normalize bit iletim hızıdır. Şekil 5.18 ve 5.19’da  $R$  ve SNR’a bağlı olarak verilen normalize bit iletim verimliliği için Şekil 5.14 ve 5.15’te yapılan en büyük normalize bit iletim verimliliği yorumları geçerlidir.

Serbest uzay yol kaybının normalize bit iletim verimliliğine etkisi yine röle kullanımının protokol üzerindeki etkinliğiyle ilişkilidir. Röleden yoğun olarak yararlanılan bir protokolda serbest uzay yol kaybı yaklaşımı altında artan  $R$  veya azalan SNR ile birlikte yaşanan başarımlar düşüşünün daha geç olacağı söylenebilir. Örneğin Şekil 5.14’te SNR=20 dB değerinde Protokol – 4’ün  $R=3$  için normalize bit iletim verimliliği eş kanal yapılarında 1.64 düzeyindeyken, serbest uzay yol kaybı yaklaşımı altında 1.70 düzeyindedir. Öte yandan Protokol – 5’te  $R=3$  için bu değerler 0.97 ve 0.76 düzeyindedir. Örnekten de görüleceği üzere röle odaklı sistemlerde (Protokol – 5 ve 6) serbest uzay yol kaybının sistem başarımı üzerine etkisi daha yüksektir.

Şekil 5.18 için yapılan yorumlar Şekil 5.19 için de geçerlidir. Artan SNR değeriyle birlikte normalize bit iletim verimliliklerinin en büyük normalize bit iletim verimliliğine yakınsadığı görülmektedir. Örneğin; Protokol – 2,  $R=2.5$  için eş kanal dağılımlı durumda SNR=12 dB’de  $\eta / R$  0.74 düzeyine ulaşırken, serbest uzay yol kaybı yaklaşımıyla SNR=11 dB için aynı seviyededir. Protokol – 6 içinse bu değerler SNR=16 ve SNR=8 dB’dir.



Şekil 5.18 : Serbest uzay yol kaybı altında  $R$ 'ye bağlı normalize bit iletim verimliliği.



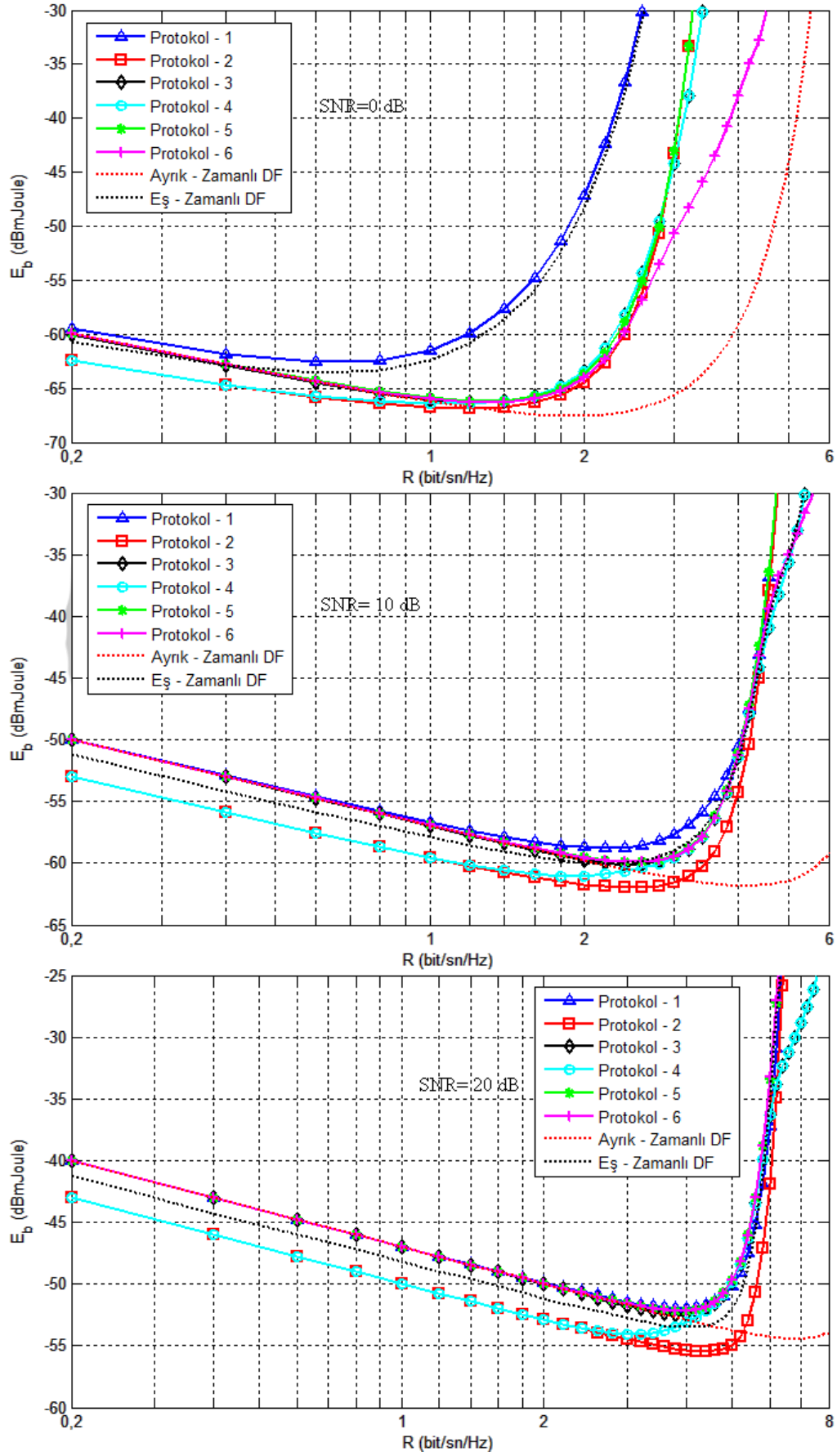
Şekil 5.19 : Serbest uzay yol kaybı altında SNR'a bağlı normalize bit iletim verimliliği.

Serbest uzay yol kaybı altında enerji verimliliği sonuçları Şekil 5.20’de sunulmuştur. Yeterince yüksek SNR değerlerinde düşük  $R$  iletim hızları için (örn; SNR=10 dB,  $R<1$ ) serbest uzay yol kaybı etkisinin her sistem için enerji verimliliğini bir miktar arttırmakla birlikte sistemler arasında önemli bir farklılaşmaya neden olmadığı görülmektedir. Şekil 5.16 için yapılmış olan yoruma paralel olarak bit başına enerji tüketimi açısından Protokol – 1, 5 ve 6’nın daha verimsiz, Protokol – 2 ve 4’ün en verimli olduğu söylenebilir.

Aynı SNR için yükselen iletim hızıyla birlikte ise hedefe yapılan bit iletiminde rölenin katkısı artacağı için protokoller arası farklılaşma öngörülebilir. Bu bilgi ışığında Şekil 5.20’den SNR=0 dB,  $R>3$  iken rölenin ARQ uyguladığı Protokol – 6’nın en yüksek enerji verimliliğine ulaştığı görülmektedir. Protokol – 3 ve 4 yine yüksek enerji verimliliği göstermeye devam etmektedir. Enerji verimliliğindeki diğer bir önemli artış yine röle temelli ARQ sistemine dayanan Protokol – 5’te gözlenmektedir.

SNR’nın daha yüksek değerleri için sistemlerin bit iletim verimliliklerine paralel olarak enerji verimliliği davranışları değişebilir. Örneğin; Şekil 5.20’den SNR=20 dB,  $R=7$  bit/sn/Hz için Protokol – 3’ün Protokol – 6’yı enerji verimliliği anlamında geçtiği gözlemlenebilir. Bu davranış farkı yükselen  $R$  ile birlikte kaynak – röle, röle – hedef arası kanalların düşük sönümlenme kazancının baskınlığının kaybedilmesidir. Artan SNR ile birlikte Protokol – 3 ve 4’ün doğrudan kaynakla olan iletişimde servis dışı kalma olasılıklarının düşmesi, rölenin  $2R$  hızlı iletimi (düşük SNR değerlerinde Şekil 5.8’e göre Protokol – 6’nın  $S_{10}$  ve  $S_{01}$  bellek durumu olasılıkları fazladır ve bu durumlarda röle  $R$  hızı ve  $P_R$  gücüyle iletim yapar) ve aynı anda aldığı  $T_1$ ,  $T_2$  bilgi dizilerinin birbirlerine olan girişim etkisi kanal kazancını yok etmektedir.

Doğrudan röle üzerinden iletişim sağlayan iki yönlü röleli sistemler olan Eş – Zamanlı ve Ayrık – Zamanlı DF sistemleri ise serbest uzay yol kaybının dikkate alınmadığı duruma göre oldukça yüksek enerji verimliliğindedirler. Yüksek  $R$  değerleri için bit iletim verimliliği başarımları daha geç yıkıma uğrayan Ayrık – Zamanlı DF sistemi bu koşullar altında en iyi enerji verimliliğine sahiptir.



Şekil 5.20 : Serbest uzay yol kaybı altında enerji verimliliği.

Şekil 5.17-5.20, Bölüm 5.3.1'deki Yaklaşım 1'de belirtilen rölenin sabit bir konumu için Protokol – 1-6'nın başarımlarını göstermektedir. Öte yandan rölenin sistem başarımları üzerindeki etkisini en üst düzeyde tutabilmek diğer bir tasarım ölçütüdür. Bu nedenle de rölenin doğru konumlandırılmış olması ortak hedefli sistemlerin başarımları için önemlidir. Bu amaçla Bölüm 5.3.2'de serbest uzay yol kaybının başarıma etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.21-5.22'de verilmiştir.

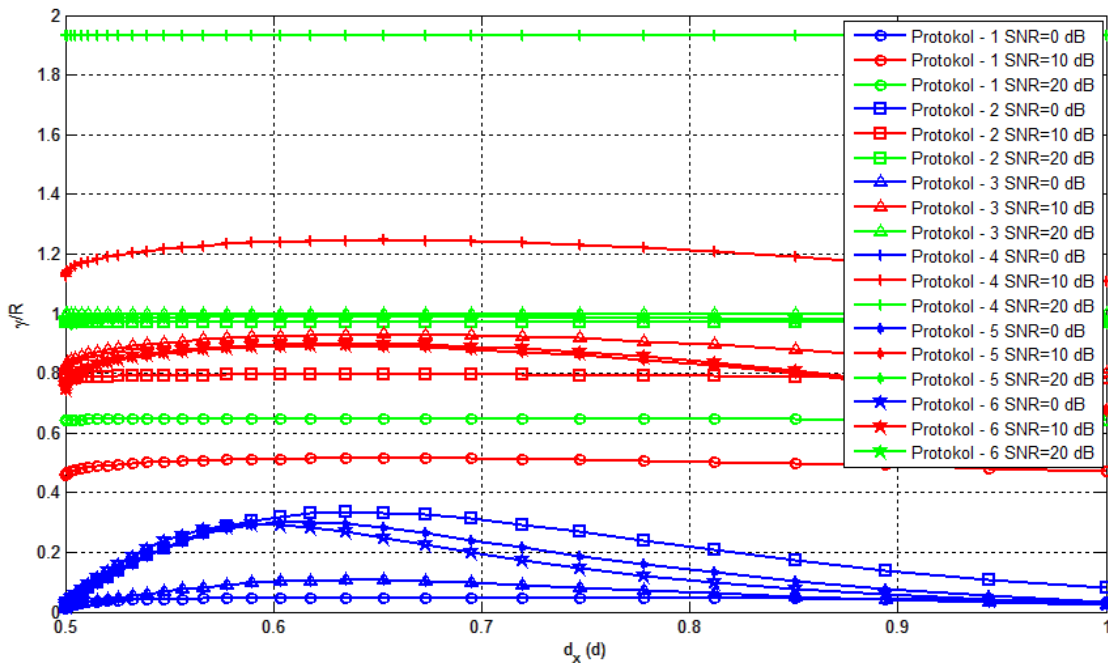
Bu şekillerde rölenin kaynaktan uzaklığı  $d_x$ 'e bağlı olarak normalize bit iletim verimliliği  $R=2$  ve 4 (bit/sn/Hz) için verilmiş olup rölenin hedeften en uzak konumu  $0.5d$  (kaynaklar ile doğrusal) ve en yakın konumu  $d$  (hedefin üzerinde) seçilmiştir (Şekil 5.10'daki yaklaşıma göre  $R$  her zaman  $T_1$ - $T_2$ - $D$  eşkenar üçgensel bölge içerisinde seçilir). Şekil 5.10'dan da görüleceği üzere rölenin hedef ve kaynaklara eşit uzaklıkta olduğu konum ( $d_x = d_y$ ) ise eşkenar üçgensel bölgenin ağırlık merkezidir ve yaklaşık  $0.58d$  olarak verilir. Şekil 5.21'den hareketle SNR'ın yeterince büyük olduğu durumda röle konumunun sistem başarımları üzerine bir etkisinin olmadığı görülür. Rölenin iki kaynak ve hedef arasındaki eş kenar üçgen içerisinde kaldığı sürece, herhangi bir  $R$  iletim hızında, yeterince yüksek iletim güçleri kullanılırsa, rölenin sistem başarımları üzerine etkisi yoktur. Öte yandan böylesi bir yaklaşım enerji verimliliği açısından sakıncalıdır. En düşük düzeyde enerji tüketimiyle en yüksek bit iletim verimliliğini elde edebilmek adına röle konumu hâlen kritik öneme sahiptir.

Öte yandan, Şekil 5.21'de SNR=0 dB ve Şekil 5.22'de tüm SNR değerleri için görülmektedir ki röle konumunun bit iletim verimliliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. Hatalı röle konumu en yüksek bit iletim verimliliğine sahip Protokol – 4'ü en kötü sistem bile yapabilir.

Röle konumunun en uygun seçimiyle ilgili diğer bir bulgu ise ayrık – zamanlı protokol yapıları için röle konumunun eş – zamanlılara göre hedefe daha yakın seçilmesi gerektiğidir. Şekil 5.22'de SNR=10 dB için Protokol – 2 en yüksek normalize bit iletim verimliliğine  $0.75d$  dolaylarında ulaşırken, Protokol – 4  $0.6d$  dolaylarında ulaşmaktadır. Bu sonucun elde edilmesi her iki sistemde de röle  $2R$  hızıyla iletim yapsa da Protokol – 2 için röle  $R$  hızıyla kaynaklar tarafından beslenirken, Protokol – 4 için iki farklı kaynak tarafından aynı anda  $R$  hızlarıyla (toplam  $2R$  hızıyla) beslenmektedir. Eş – zamanlı kaynak iletiminin neden olduğu

işaretler arası girişim eş – zamanlı iletişim sistemlerinde (ayrık – zamanlı iletişim sistemlerine göre) rölenin kaynağa daha yakın konumlandırılmasını gerektirir.

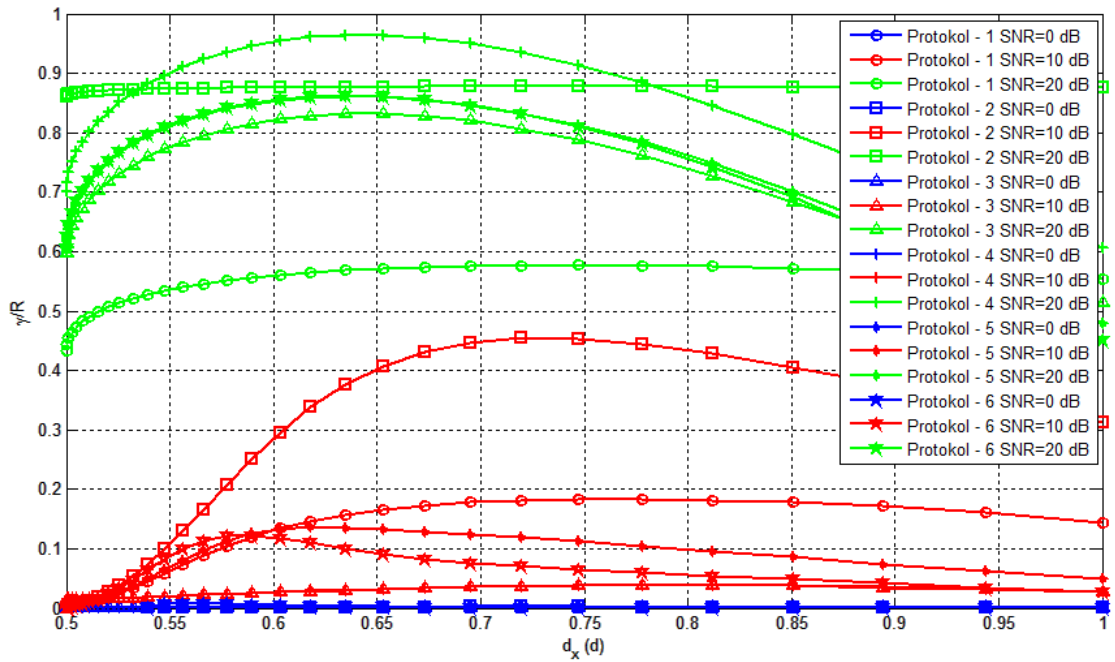
şekil 5.21 ve 5.22’den elde edilebilecek diğeri bir sonuç ise artan  $R$  ile birlikte ayrık – zamanlı iletişim sistemlerinde röleyi hedefe, eş – zamanlı iletişim sistemlerindeyse kaynaklara yaklaştırmanın başarıma daha fazla katkı sağlamasıdır. şekil 5.21’de SNR= 0 dB için Protokol – 2 en yüksek normalize iletim verimliliğine  $0.65d$  uzaklığında ulaşırken, şekil 5.22’de SNR=10 dB için en yüksek verime  $0.75d$  uzaklık düzeyinde erişmektedir. Bu kuramsal olarak da beklenen bir sonuçtur; çünkü ayrık – zamanlı iletişim yapılarında röle – kaynak arası iletim hızı  $R$  iken, röle – hedef arası iletim hızı  $2R$ ’dir. Benzer şekilde eş – zamanlı iletişim sistemi yapısında olan Protokol – 6’ya bakılacak olursa; şekil 5.21’de SNR=0 dB için en büyük normalize bit iletim verimliliği  $0.62d$  seviyesinde elde edilirken, şekil 5.22’de SNR=10 dB için  $0.59d$  seviyesinde elde edilmektedir. Bu da kuramsal olarak beklenen bir sonuçtur. Artan iletim hızıyla birlikte rölenin  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarından eş – zamanlı aldđı girişimsel ( $R + R$  hızlı) bilgi işaretlerinin servis dışı kalma olasılıkları, hedefe aktardđı  $2R$  hızlı bilgi işaretinin servis dışı kalma olasılığından fazladır.



**şekil 5.21 :** Ortak hedefli röleli sistem protokolleri için röle konumunun başarıma etkisi,  $R=2$  (bit/sn/Hz).

Ayrıca röle etkisinin daha belirgin beklendiği protokol yapılarında (rölede ARQ temelli protokol yapıları olan Protokol – 5 ve 6, röle katkısını mutlak şekilde bekleyen Protokol – 1) röle konumunun doğru seçimi sistem başarımı açısından daha fazla önem arz etmektedir. Şekil 5.21 ve 5.22’de Protokol – 5 ve 6’nın artan  $d_x$  uzaklığıyla başarım anlamında daha erken yıkıma uğraması buna örnek olarak verilebilir.

Röle konumunun seçiminin enerji verimliliğine de etkisinden söz edilebilir. Rölenin en uygun konumda seçiminin normalize bit iletim verimliliğine etkisinden hareketle bit iletim hızını da en yüksek düzeyde tutacağı öngörülebilir. Aynı protokol için bellek durumlarında harcanan enerji miktarı değişmeyeceği ve rölenin konumunun en uygun seçimine bağlı olarak bellek durumlarında servis dışı kalma olasılıkları düşeceği için enerji verimliliğinin yükseleceğinden söz edilebilir.



**Şekil 5.22 :** Ortak hedefli röleli sistem protokolleri için röle konumunun başarıma etkisi,  $R=4$  (bit/sn/Hz).



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, literatürde çeşitli protokollerle desteklenen iki yönlü röleli sistemlerin bit iletim ve enerji verimliliği çıkarımları Bölüm 2.2.2’de verilen genelleştirilmiş iletişim sistemi yapısına uyarlanmıştır. Çalışma sırasında fiziksel katman ağ kodlamalı durumlarda karmaşık düzlem ağ kodlamalı sistemlerden faydalanılmıştır. Tezin literatüre katkısını daha iyi gösterebilmek adına fiziksel katman ağ kodlamalı ve iki yönlü röleli sistem yapıları Bölüm 3 ve 4’te incelenmiştir.

Bölüm 5’te ortak hedefli röleli sistemler (Bölüm 2.2.2’de açıklanan genelleştirilmiş sistem yapısı) için ARQ temelli altı farklı protokol önerilmiş olup bu sistemler güvenilirlik ve yüksek hız sağlaması bakımından iki ana grupta toplanmıştır. Tüm sistemler farklı ortam koşulları altında (SNR,  $R$ ) bit iletim ve enerji verimliliği ekseninde karşılaştırılmıştır. Söz konusu çıkarımlar ve karşılaştırmalar eş dağılımlı kanal yapıları ve serbest uzay yol kaybı yaklaşımı altında hem kendi aralarında hem de literatürdeki örnek yapılarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca, önerilmiş olan protokoller için rölenin konumlandırılmasına bağlı başarımların sonuçları incelenmiştir.

Tüm protokoller içerisinde en yüksek bit iletim başarımlarını sunan sistem olarak Protokol – 4 görünürken, en düşüğünü Protokol – 1 sağlamaktadır. Enerji verimliliği anlamında ise seçilen SNR ve  $R$ ’ye bağlı olmakla birlikte Protokol – 3-4 en iyi, Protokol – 1 en kötü sonucu vermektedir. Protokol – 1-6 için başarımların çıkarımları ve literatürdeki sistemlerle olan karşılaştırmalar Bölüm 5.5’te ayrıntılı bir şekilde yorumlanmıştır. Temel olarak önerilmiş olan protokoller yorumlanacak olursa; ayrık – zamanlı iletişim sistemleri olan protokoller iletim hızı artışına karşı daha dirençliyen (artan  $R$  ile birlikte başarımların daha geç sıfırlanması), eş – zamanlı sistemler daha yüksek bit iletim hızlarına ulaşabilmektedir. Enerji verimliliği anlamındaysa hedefin ARQ uyguladığı sistemlerin rölenin ARQ uyguladığı sistemlere göre daha verimli oldukları belirtilebilir. Öte yandan serbest uzay yol kaybının dikkate alındığı durumlarda röle temelli ARQ’lu sistemlerin hem bit iletim hem de enerji verimliliği başarımlarındaki sıçrayış en büyük olmaktadır.

Bu tez çalışması boyunca elde edilen tüm kuramsal formüller en genel anlamda verilmiş olmasına karşın (her bir kaynağın farklı  $P$ ,  $R$ ,  $N_0$ ,  $\sigma^2$  değerlerine sahip olabileceği) benzetim sonuçları kaynakların eş iletim gücü ve hızlarına sahip olduğu, röle ve hedefe doğru eş dağılımlı kanallar üzerinden iletim yaptıkları ve alıcı girişlerinde aynı güçte gürültüye maruz kaldıkları varsayımı altında verilmiş ve yorumlanmıştır. Öte yandan gündelik hayatta da sıklıkla karşılaşılabilen kaynakların farklı olanaklara sahip olduğu durumlar için analizler tekrarlanırsa önerilmiş olan protokollerin başarımına ilişkin yorumların değişmesi mümkündür. Örneğin; en yüksek sistem başarımının sistemdeki kullanıcılardan her birinin aldığı servis hızlarının en küçüğü olarak alındığı bir yaklaşımda (sistemin en büyük bit iletim sığası, en düşük bit iletim sığası alan kullanıcının hızına eşit olması durumu, benzer yorum enerji verimliliği için türetilebilir) hız odaklı protokollerin güvenilirlik odaklı sistemlerin altında kalacağı öngörülebilir. Bu nedenle, farklı ortam koşulları için benzetim sonuçlarının tekrarlanması ve yorumlanması gerekir. Bu yorumlar sonucunda protokoller üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılabilir.

Önerilmiş olan protokollerin en hızlı veya enerji verimliliği en yüksek olmak gibi mutlak bir iddiası yoktur. Tasarımlar yapılırken güvenilirlik/başarım ve sistem karmaşıklığı aynı ekseninde değerlendirilmiş, düşük karmaşıklıkta en verimli sistemlerin oluşturulmasına çalışılmıştır.

Yapılmış olan bu çalışmayı literatürdeki farklı yaklaşımlara genelleştirmek mümkündür. Önerilmiş olan protokolleri  $N$  kullanıcı yapıya genelleştirmek, birden fazla röleli yaklaşımlar altında incelemek mümkündür.  $N$  kullanıcı protokol yapıları için tüm sistemlerin normalize bit iletim verimliliklerinin yükseleceği, dolayısıyla en büyük bit iletim hızlarının artacağı öngörülebilir. Fakat kullanıcı başına elde edilen iletim sığası, eş – zamanlı iletişim sistemlerinde farklı kullanıcıların işaretleri arasındaki girişim artacağı, ayrık – zamanlı iletişim sistemleri içinse kullanıcıların iletimi için ihtiyaç duyulan süre artacağı için azalacağı söylenebilir. Ayrıca rölenin iletim yapacağı bilgi işaretinin hızının artmasına bağlı servis dışı kalma olasılığının yükselmesi de bu sonucun oluşmasına etken olacaktır. Birden fazla röleli sistemlerle ise rölelerin birlikte kullanımı ya da röle seçimi yapılması kaydıyla sistem başarımını bit iletim hızı ya da enerji verimliliği anlamında daha iyi duruma getirmek mümkündür.

Bu tezi destekleyecek diğ er önemli bir  alışma, Bölüm 3'te karmaşık düzlem ağ kodlaması için hata olasılığı üzerinden kuramsal olarak gösterilen, alıcı birimde  eşitme kazancının sağlanabilmesi üzerinedir. Doğru kod tasarımlarıyla ortak hedefli sistemler için alıcı girişinde en büyük oran birleştiricisi (MRC) kullanımı mümkündür. Bu yolla, Bölüm 5'te önerilen protokoller için hedefte, bir çevrimlik iletişim sonunda kaynaklar ve röle üzerinden gelen işaretler MRC ile birleştirilerek, birleştirilmiş bu işaret üzerinden servis dışı kalma olasılıkları hesaplanabilir. Servis dışı kalma olasılığına logaritmik etki eden SNR'ın artmasına bağlı olarak sistem başarımlarının artacağı öngörülebilir. Tüm protokoller için yarar sağlayacak olmakla beraber, MRC kullanımı röle odaklı iletişim protokolleri olan Protokol – 1, 3, 5 ve 6 i in daha fazla başarım artışı sağlayacaktır. Protokoller üzerinde bazı değişiklikler yaparak MRC'nin başarım etkisi en büyük düzeyde tutulabilir. Ayrıca, MRC  alışması birden fazla röleli sistemler için (rölelerin işaretlerinin ya da rölelerin ve kaynakların işaretlerinin birleştirilmesi şeklinde) yapmak da mümkündür.

Konuya ilişkin diğ er bir çalışma [28]'de anlatılan ve Bölüm 3'te de açıklanan akıllı sez – ve – aktar yönteminin röleye uygulanmasıyla her bir protokolün enerji verimliliğinin arttırılması olabilir. Bu yolla, röle – hedef arası iletişimde servis dışı kalmamak için gerekli gücün altında (işaretleşme tekrarlarını arttırmamak için) ya da üzerinde (gereksinim dışı gücü tüketimini engellemek için) bir g c le iletim yapılmasının önüne geçilebilir.

Son olarak ise bu tez çalışmasında protokol tasarımları yapılırken temel alınan güvenilir/hızlı sistem yaklaşımları korunarak protokoller farklı röle aktarım teknikleri için uyarlanabilir (farklı ARQ teknikleri kullanılabilir, AF vs. uygulanabilir), daha verimli hale getirilebilir. Daha karmaşık ama yüksek başarımli protokoller tasarlamak da mümkündür. Örneğin eş – zamanlı iletişim yapısında hedef ve rölenin birlikte ARQ uyguladığı yapı on altı durumlu bellek yapısı nedeniyle bu tezde ele alınmamıştır. Benzer şekilde ayrık – zamanlı röleli sistem yapılarından Protokol – 2 sekiz durumlu bellek yapısı yerine beş durumlu tasarlanmıştır. Bu durum iletişim çevriminin bazı durumlarında  $T_1$ ,  $T_2$  kaynaklarının bilgi işaretlerinin kaybına (rölenin aldığı kaynak işaretini hedefe iletmeden silmesi, kaynağın aynı işareti tekrar iletmesi) dolayısıyla sistem başarımında bir miktar düşüşe (en büyük bit iletim verimliliğini etkilememekte, daha yüksek iletim hızı, daha düşük iletim g c leri için sistem başarımını olumsuz etkilemektedir) neden olmaktadır.



## KAYNAKLAR

- [1] **Proakis, J. G. ve Salehi, M.** (2002). *Communication Systems Engineering*, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall.
- [2] **Atan, S.** (2010). Pasif Röleli İşbirlikli İletişim Sistemlerinde Yöntem Karşılaştırması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisans Tezi, Ocak.
- [3] **Haykin, S.** (2001). *Communication Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [4] **Url-1** <[http://www.ericsson.com/thinkingahead/networked\\_society/networked\\_society\\_essentials](http://www.ericsson.com/thinkingahead/networked_society/networked_society_essentials)>, 23.10.2014.
- [5] **Alamouti, S.**, (1998). A Simple Transmitter Diversity Scheme for Wireless Communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 16, 1451 – 1458.
- [6] **Naguib, A. F. and Calderbank, A. R.** (2001). Space-Time Coding and Signal Processing for High Data Rate Wireless Communications, *Wireless*.
- [7] **Tarokh, V., Jafarkhani, H. and Calderbank, A. R.**, (1999). Space – Time Block Coding for Wireless Communications: Performance Results, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 451–460.
- [8] **Nosratinia, A. Hunter, T. E. and Hedayet, A.** (2004). Cooperative Communication in Wireless Networks, *IEEE Commun. Magazine*, pp. 74-80.
- [9] **Url-2** <[http://medya.turkcell.com.tr/turkcell-4g-lte-advanced-hiz-testi-basintoplantisi-video\\_4843.html](http://medya.turkcell.com.tr/turkcell-4g-lte-advanced-hiz-testi-basintoplantisi-video_4843.html)>, 31.07.2014.
- [10] **Chen, Q., Gürsoy, M. C.** (2011). Energy Efficiency and Goodput Analysis in Two-Way Wireless Relay Networks, in *Proc. of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*.
- [11] **Chen, Z., Gong, Q., Zhang, C., Wei, G.** (2012). ARQ Protocols for Two-Way Wireless Relay Systems: Design and Performance Analysis, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Article ID 980241, 6 Nisan.
- [12] **Chen, Q., Gürsoy, M. C.** (2013). Spectrum and Energy Efficiency in Two-Way Multi-Relay Networks with Selective Relaying, *Military Communications Conference*.
- [13] **Popovski, P., Yomo, H.**, (2006). Bi-directional Amplification of Throughput in a Wireless Multi-Hop Network, *IEEE 63rd Vehicular Technology Conference*, Vol. 6.

- [14] **Chen, Q., Gürsoy, M. C.** (2010). Energy Efficiency Analysis in Amplify-and-Forward and Decode-and-Forward Cooperative Networks, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*.
- [15] **Laneman, J. N.** (2006). *Cooperation in Wireless Networks: Principles and Applications*. Springer, ch. Cooperative Diversity: Models, Algorithms and Architectures, 163-188.
- [16] **Bletsas, A., Shin, H.,** (2007). Cooperative Communications with Outage-Optimal Opportunistic Relaying, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 6, No. 9, Eylül.
- [17] **Bletsas, A., Khisti, A., Reed, D. P., Lippman, A.** (2006). A Simple Cooperative Diversity Method Based on Network Path Selection *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 24, No. 3, Mart.
- [18] **Laneman, J. N., Tse, D. N. C. and Wornell, G. W.** (2004). Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Aralık.
- [19] **Zhang, S., Liew S., Lam, P.** (2006). Hot Topic: Physical Layer Network Coding, Proceedings of the 12th Annual International Conference on Computing and Networking.
- [20] **Wang, T., Giannakis, G. B.** (2008). Complex Field Network Coding for Multiuser Cooperative Communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 26, No. 3, Nisan.
- [21] **Shannon C. E.** (1961). Two-Way Communication Channels, in *Proceedings of Forth Berkeley Symposium on Math. Statist. and Prob.*, vol. 1, pp. 611–644.
- [22] **Liu K. J. R., Sadek, A.K., Su, W., Kwasinski, A.** (2009). Cooperative Communications and Networking, Cambridge University Press.
- [23] **Tarokh V., Seshadri, N., and Calderbank, A. R.** (1998). Space-time codes for high data rate wireless communication: Performance analysis and code construction, *IEEE Transactions on Information Theory* 44 vol. 44, no. 2, pp. 744–765, Mart.
- [24] **Jafarkhani, H.** (2005). Space-Time Coding Theory and Practice, Cambridge University Press, New York
- [25] **Vucetic, B., Yuan, J.** (2003). Space-Time Coding, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex.
- [26] **Josiam, K. M., Nam Y.H. and Khan, F.** (2009). Intelligent Coding in Relays using Coding and Superposition for Throughput and Coverage Enhancements, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, pp. 27–33, Mart.
- [27] **Zhang, S., Liew, S. C. and Lam, P.** (2006). Physical Layer Network Coding, *ACMMobiCom '06*.

- [28] **Wang, T., Giannakis, G. B., R. Wang** (2008). Smart Regenerative Relays for Link-Adaptive Cooperative Communications, *IEEE Trans. Communications*.
- [29] **Rankov, B. and Wittneben, A.** (2007). Spectral Efficient Protocols for Half-Duplex Fading Relay Channels, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 2, Şubat.
- [30] **Shannon, C. E.,** (1948). The Mathematical Theory of Communication, *Bell Syst. Tech. J.*, vol 27, pp. 379-423, 623-656, Temmuz – Ekim.
- [31] **Arikan, E.,** (2009). Channel Polarization: A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels, *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 55, no. 7, pp. 3051-3073, Temmuz.
- [32] **Narasimhan, R.,** (2007). Individual Outage Rate Regions for Fading Multiple Access Channels, *IEEE International Symposium on Information Theory*, 24 – 29 Haziran.



## **EKLER**

**EK A:** Otomatik Yineleme İsteme

**EK B:** Telsiz İletişim Sistemlerinde Servis Dışı Kalma Olasılığı

## EK A: Otomatik Yineleme İsteme

İletişim sistemlerinin en temel amaçlarından birisi veriyi en hızlı ve hatasız şekilde hedef birimlere iletmektir. Bu anlamda ihtiyaç duyulan hızlardaki iletim için uç birimlerde çeşitli yöntemlerle (FEC, CRC) hata kontrolü yapılmakta ve sunulan servislerin kalitesi belirli seviyelerde tutulmaya çalışılmaktadır.

İletişim sistemleriyle sunulan servisleri ikiye ayırmak mümkündür; bunlardan ilk grup hız ve gecikmeye hassas sistemler, ikincisi ise bilginin güvenilirliğine hassas sistemler. İnternette gezinme, telekonferans, televizyon yayını gibi hizmetler hız ve paket gecikmesine duyarlıyken; finansal veriler, kullanıcı özlük bilgileri gibi verilerin aktarımında bilgi güvenilirliği çok önemlidir. Dolayısıyla ihtiyaç duyulan servis kalitesi ve ölçütlerine göre tasarımlar şekillendirilmektedir. Örneğin; hata yayılımının çok önemli olmadığı ama paket gecikmesi ve hız konusunda hassas televizyon yayınları UDP gibi hata kontrolü yapılmayan taşıma katmanı teknolojileriyle iletilebilirken; telefon görüşmelerinin ücretlendirilmesi gibi hataya çok duyarlı sistemler TCP/SCTP gibi hata ve bağlantı kontrolü yapan sağlamalı (checksum) paket iletim teknolojilerini kullanmaktadır.

Otomatik yineleme isteme (ARQ) TCP ve SCTP gibi iletişim sistemleriyle uygulanabilmekte olup temel anlamda, iletim sonrasında hedefin aldığı paketlerin sağlanmasını yaparak kaynak birime işaretleşmenin doğru (ACK paketi göndermesi) ya da hatalı (NACK paketi göndermesi) olduğunu bildirmesidir. Bu yolla kaynak birim, gönderdiği işaretin doğru ya da hatalı alındığını öğrenmiş ve hatalı iletim durumunda paket yineleme yaparak hata yayılımını engellemiş olur. Ayrıca ARQ, hedef birimin herhangi bir geri bildirimde bulunmadığı ya da geri bildirimin kaynak tarafından alınmadığı durumlarda da belirli eşik tanımlamalarıyla ( $x$  saniye boyunca hedeften geri bildirim alınmazsa işareti yinele gibi) paket yinelemeyi garanti altına almaktadır. Akış kontrolü, pencere açıklığı (flow control, window size) gibi ölçütlerle kaynağın orantısız hızda (flow control) ve miktarda (kaynak geri bildirim almadığı en fazla  $x$  byte'lık bilgi iletir,  $x$  byte geçildiği zaman bekler. Bu sırada geri bildirim aldığı paket boyutunda yeni işareti hedefe aktarır) iletim yapmasının önüne ve sistem kaynaklarının kontrolsüz tüketmesinin önüne geçilmektedir.

Literatürde ARQ üzerine yapılmış birçok çalışma olmasına karşın, yalnızca dur ve bekle ARQ sistemleri bu tez çalışması kapsamına alınmıştır. Bu anlamda; incelenen tüm protokoller için kaynak iletimi neticesinde hedefin başarılı/başarısız çözme olaylarını anında geri bildirimde bulunduğu ve kaynak tarafından başarılı bir şekilde alındığı (ya da geri bildirimlerin kaynağa ulaşma süresinin sistem başarımını zaman kaynağının kullanımı anlamında, pencere darboğaza sokmadığı) varsayımıyla yapılmıştır.

ARQ'ya ilişkin bir başka önemli nokta hata kontrolünün simge boyutunda değil çerçeve (frame) boyutunda yapılmasıdır. Bunun için her bit dizisinin sağlanması çerçevelere eklenerek hedef birimin doğru çözme olayını gerçekleştirebilip gerçekleştiremediğini kaynaktan edindiği bu sağlama yardımıyla kontrol edebilmesi sağlanır. Daha uzun çerçeveler için kontrol yapılması iletilen işaretin verimliliğini arttırırken (daha uzun bilgi içeren bit dizileri için daha küçük sağlama bilgi dizilerinin aktarılması) hata durumunda tekrarlanması gereken bilgi dizisi miktarı artacağı için iletim verimliliğini düşürür. Bu nedenle çerçeve büyüklüklerinin seçimi iletişim sistemlerinin başarımı için önemli bir ölçüttür. Öte yandan, bu çalışma kapsamında Bölüm 4 ve 5'te başarım ölçütü olarak hata olasılıkları değil servis dışı kalma olasılıkları ele alınmıştır. Hedef birimin aldığı  $R$  hızlı işaretin kanalın iletim

sıgasının üzerinde olup olmadığını anlamak için herhangi bir doğrulama yapmaya ihtiyacı yoktur. Yalnızca SNR ve kaynakla arasındaki mükemmel kanal bilgisi (CSI) ışığında servis dışı kalma durumunu her bir simge iletimi için tek başına belirleyebilir. Bu nedenle tez çalışması kapsamında çerçeve uzunlukları ve sistem başarımının ilişkisi ekseninde bir inceleme yapılmamıştır.

Son olarak, alıcı birimde elde edilen işaretin servis dışı kalmamış olmasının bilgi işaretinin doğru iletildiği anlamına gelmediği unutulmamalıdır. Anlık kanal sıgasının altında bir hızla iletim yapılması verimli iletişim için gerek koşul olsa da yeter koşul değildir. Günümüzde kullanılan ileri kanal kodlama teknikleri kanal sıgasına oldukça yaklaşabiliyor olmakla beraber [31], kanal sıgası verimli iletişim için üst sınır teşkil etmektedir.

## **EK B: Telsiz İletişim Sistemlerinde Servis Dışı Kalma Olasılığı**

Bu bölümde Bölüm 5'te önerilen Ayırık – Zamanlı ve Eş – Zamanlı iletişim protokolleri için kanallardaki servis dışı kalma olasılıklarının matematiksel çıkarımları Rayleigh kanallar için verilecektir. Shannon tarafından [30]'da gösterildiği üzere  $T_1$  ve  $R$  gibi iki düğüm arasındaki kanalda taşınabilecek en büyük veri miktarının beklenen değeri

$$\bar{C} = W \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 \sigma_{1R}^2}{N_0 W} \right) \quad (\text{B.1})$$

olarak verilir. Burada  $\bar{C}$  bit/sn cinsinden olup  $W$  iletim bant genişliğini,  $P_1$   $T_1$ 'in iletim gücünü ve  $N_0$  toplamsal beyaz Gauss gürültüsünün tek yönlü güç spektral yoğunluğunu göstermektedir.  $T_1$  ve  $R$  arasındaki  $h_{1R}$  ile gösterilen Rayleigh kanalın sönmüleme katsayısı ise  $CN(0, \sigma_{1R}^2)$  olarak alınmıştır. Aynı kanalın, iletim bant genişliğinden bağımsız kapasitesinin beklenen değeri ise aşağıdaki şekilde verilir:

$$\bar{R}^{th} = \log_2 (1 + \bar{\gamma}_{1R}). \quad (\text{B.2})$$

(B.2)'de  $\bar{R}^{th}$  bit/sn/Hz cinsinden olup  $T_1$  ile  $R$  arasındaki ortalama işaret – gürültü oranı

$$\bar{\gamma}_{1R} = \frac{P_1 \sigma_{1R}^2}{N_0} \quad (\text{B.3})$$

şeklinde ifade edilir. Öte yandan kanaldaki, servis dışı kalma olasılığına bağlı otomatik yineleme isteme (ARQ) uygulanabilmesi için (özellikle durağan olmayan kanallarda) anlık iletim sıgasının tanımlanması gerekir:

$$R^{th} = \log_2 (1 + \gamma_{1R}) = \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_{1R}|^2}{N_0} \right). \quad (\text{B.4})$$

(B.4)'ten görüldüğü üzere kanaldaki anlık – işaret gürültü oranı

$$\gamma_{1R} = \frac{P_1 |h_{1R}|^2}{N_0} \quad (\text{B.5})$$

olarak verilir. Bu bilgiler ışığında  $T_1$ 'in  $R_1$  hızıyla iletimi sonunda R'de alınan işaretin servis dışı kalma olasılığı

$$p_{out,1} = \Pr[R_1 > R^{th}] \quad (\text{B.6})$$

olup (B.4)'teki anlık iletim sığası (B.6)'da yerine konulursa

$$p_{out,1} = \Pr \left[ R_1 > \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_{1R}|^2}{N_0} \right) \right] \quad (\text{B.7})$$

elde edilir. (B.7)'de kanal sönümleme katsayısının zarfının karesi (gücü) yalnız bırakılarak

$$p_{out,1} = \Pr \left[ \frac{(2^{R_1} - 1)N_0}{P_1} > |h_{1R}|^2 \right] \quad (\text{B.8})$$

elde edilir. Rayleigh sönümlemeli  $h_{1R}$  kanal katsayısının zarfının karesel değeri  $X_1 = |h_{1R}|^2$  olmak üzere  $X_1$ 'in olasılık yoğunluk fonksiyonu üstel dağılımlı olarak ifade edilebilir:

$$p(X_1) = \frac{1}{\bar{X}_1} e^{-X_1/\bar{X}_1}. \quad (\text{B.9})$$

Bu bilgiler ışığında  $h_{1R}$  değeri için  $R_1$  hızında servis dışı kalma olasılığı

$$p_{out,1} = \int_A^B p(X_1) dx_1 \quad (\text{B.10})$$

olarak verilebilir. Burada (B.10)'daki integralin alt ve üst sınırları; A, kanal zarfının sıfırın altında bir değer olamayacağı ve B, (B.8)'de verilen servis dışı kalma olasılığı fonksiyonuna göre yerine konulursa

$$p_{out,1} = \int_0^{\frac{(2^{R_1} - 1)N_0}{P_1}} p(X_1) dx_1 = \int_0^{\frac{(2^{R_1} - 1)N_0}{P_1}} \frac{1}{\bar{X}_1} e^{-X_1/\bar{X}_1} dx_1 \quad (\text{B.11})$$

elde edilir. (B.11)'de

$$\bar{X}_1 = |\bar{h}_{1R}|^2 = \sigma_{1R}^2 \quad (\text{B.12})$$

olarak servis dışı kalma olasılığı

$$p_{out,1} = \frac{1}{\sigma_{1R}^2} \int_0^{\frac{(2^{R_1}-1)N_0}{P_1}} e^{-x_1/\sigma_{1R}^2} dx_1 \quad (B.13)$$

olarak verilip (B.13) çözülürse

$$p_{out,1} = p_{1R} = 1 - e^{-\frac{(2^{R_1}-1)N_0}{\sigma_{1R}^2 P_1}} \quad (B.14)$$

ifadesine ulaşılır. (B.14)'te verilen  $T_1$ -R arası iletişim için servis dışı kalma olasılığı hesabı 5. Bölüm'deki ayrık – zamanlı iletişim sistemlerindeki tüm kanallar ve eş – zamanlı iletişim sistemlerindeki R-D arası kanallar için doğru iletim hızı, gücü ve kanal sönmülme katsayılarının kullanılması kaydıyla geçerlidir.

İkinci olarak, eş – zamanlı iletişim durumunda  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının  $T_1$ -R ve  $T_2$ -R kanalları üzerinden  $P_1$  ve  $P_2$  güçleri,  $R_1$  ve  $R_2$  hızlarıyla aynı anda iletimi sonrası rölede elde edilen ortak servis dışı kalma olasılığının çıkarımları verilecektir. İki kaynağın aynı anda iletim yaptığı durumda servis dışı kalma olasılığı (B.14)'ten farklı olup öncelikle  $T_1$  ve  $T_2$  kaynaklarının ilettikleri bilgi işaretlerinin servis dışı kalma eşiklerinin verilmesi faydalı olacaktır [32].

Şekil B.1'de verilen 0 bölgesi her iki kaynağın işaretlenmesinin, 01  $T_1$ 'in işaretlenmesinin, 10  $T_2$ 'nin işaretlenmesinin servis dışı kalma olasılığını gösterirken 1 bölgesi ise her iki kaynağın birlikte verimli işaretlenmediği bölge olarak verilmektedir.

Bu bilgiler ışığında, ilk olarak 01 bölgesinin olasılığı

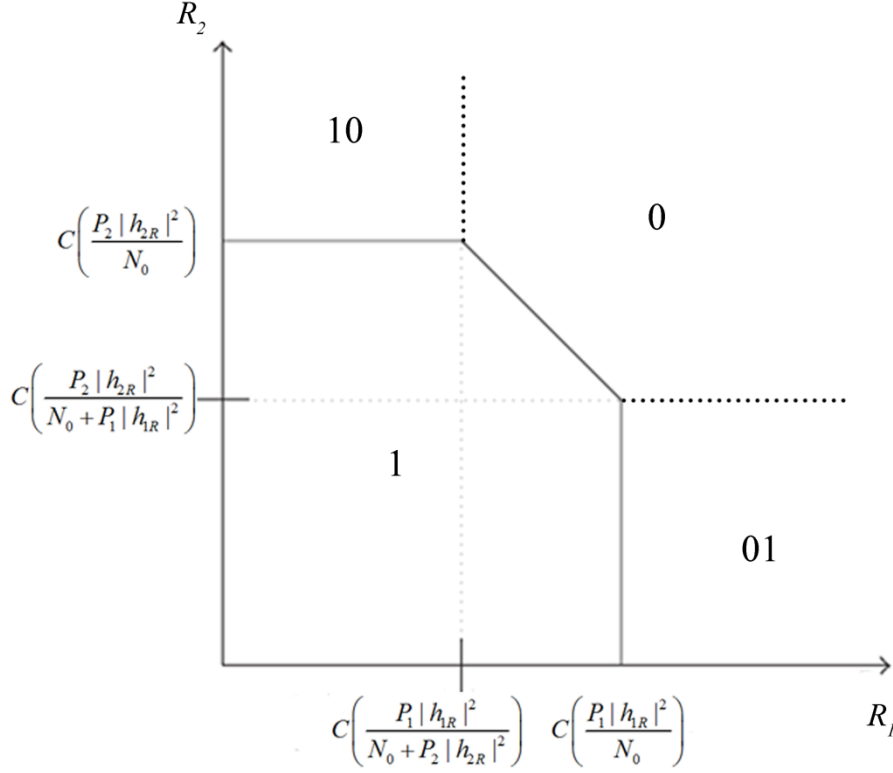
$$p_{01} = \Pr \left[ R_1 > \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_{1R}|^2}{N_0} \right), R_2 < \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |h_{2R}|^2}{N_0 + P_1 |h_{1R}|^2} \right) \right] \quad (B.15)$$

şeklinde verilir. (B.15)'te  $R_1$  'e ilişkin servis dışı kalma olasılığı (B.7) ile aynı olup (B.8)'le benzer şekilde verilebilir.  $R_2$  içinse gerekli düzenlemeler yapılarak  $|h_{2R}|^2$  değişkeni yalnız bırakılırsa

$$p_{01} = \Pr \left[ \frac{(2^{R_1}-1)N_0}{P_1} > |h_{1R}|^2, \frac{(2^{R_2}-1)N_0}{P_2} + \frac{(2^{R_2}-1)P_1 |h_{1R}|^2}{P_2} < |h_{2R}|^2 \right] \quad (B.16)$$

ifadesine ulaşılır.  $|h_{1R}|^2 = X_1$  ve  $|h_{2R}|^2 = X_2$  değişken dönüşümleri yapılırsa 01 bölgesinin olasılığı aşağıdaki gibi verilebilir:

$$p_{01} = \int_A^B \int_C^D p(X_1)p(X_2)dx_1dx_2. \quad (B.17)$$



**Şekil B.1 :** Eş – zamanlı iletişim servis dışı kalma bölgeleri.

(B.17)’de  $A$  ve  $B$  sınırları (B.16)’dan görüleceği üzere (B.11)’de verildiği gibi olup  $C$  ve  $D$  için (B.16)’dan yararlanılabilir. Bu bilgi ışığında (B.16)’nın  $|h_{2R}|^2$  için (yani  $X_2$  için) alt sınır belirttiği görülmektedir. Bir kanalın zarfının ise sıfırdan büyük olması gerektiği bilgisiyle  $D$  üst sınırı sonsuz olarak alınır. Böylece Rayleigh dağılımlı kanallarda  $X_1$  ve  $X_2$ ’nin olasılık yoğunluk fonksiyonunun üstel dağılımlı olduğu bilgisiyle

$$p_{01} = \frac{1}{\sigma_{1R}^2 \sigma_{2R}^2} \int_0^{\frac{(2^{R_1}-1)N_0}{P_1}} \int_{\frac{(2^{R_2}-1)N_0}{P_2} + \frac{(2^{R_2}-1)P_1 X_1}{P_2}}^{\infty} e^{-(X_1/\sigma_{1R}^2) - (X_2/\sigma_{2R}^2)} dx_1 dx_2 \quad (\text{B.18})$$

yazılabilir. (B.18) integrali çözülürse

$$p_{01} = \frac{\sigma_{2R}^2 P_2}{\sigma_{2R}^2 P_2 + (2^{R_2}-1)\sigma_{1R}^2 P_1} \left( e^{\frac{-(2^{R_2}-1)\sigma_{nR}^2}{\sigma_{2R}^2 P_2}} - e^{\frac{-(2^{R_1}-1)\sigma_{nR}^2}{\sigma_{1R}^2 P_1}} e^{\frac{-(2^{R_2}-1)2^{R_1}\sigma_{nR}^2}{\sigma_{2R}^2 P_2}} \right) \quad (\text{B.19})$$

elde edilir. Şekil B.1’den 01 ve 10 alanlarının simetrisi nedeniyle 10 bölgesinin olasılığı

$$p_{10} = \frac{\sigma_{1R}^2 P_1}{\sigma_{1R}^2 P_1 + (2^{R_1}-1)\sigma_{2R}^2 P_2} \left( e^{\frac{-(2^{R_2}-1)\sigma_{nR}^2}{\sigma_{1R}^2 P_1}} - e^{\frac{-(2^{R_2}-1)\sigma_{nR}^2}{\sigma_{2R}^2 P_2}} e^{\frac{-(2^{R_1}-1)2^{R_2}\sigma_{nR}^2}{\sigma_{1R}^2 P_1}} \right) \quad (\text{B.20})$$

olarak doğrudan yazılabilir. Üçüncü olarak 0 bölgesinin olasılığı hesaplanacak olursa Şekil B.1'e göre

$$p_0 = \Pr \left[ \begin{array}{l} R_1 > \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_{1R}|^2}{N_0 + P_2 |h_{2R}|^2} \right), R_2 > \log_2 \left( 1 + \frac{P_2 |h_{2R}|^2}{N_0 + P_1 |h_{1R}|^2} \right), \\ R_1 + R_2 > \log_2 \left( 1 + \frac{P_1 |h_{1R}|^2 + P_2 |h_{2R}|^2}{N_0} \right) \end{array} \right] \quad (\text{B.21})$$

yazılabilir ve en genel olarak

$$p_0 = \int_E^F \int_G^H p(X_1)p(X_2)dx_1dx_2 \quad (\text{B.22})$$

şeklinde hesaplanır. Burada  $E, F, G$  ve  $H$  integral sınırları  $p_{01}$  için verilen yaklaşımla bulunabilir.  $|h_{1R}|^2 = X_1$  ve  $|h_{2R}|^2 = X_2$  dönüşümleri yapılır, Rayleigh dağılımlı kanallar için  $X_1$  ve  $X_2$ 'nin olasılık yoğunluk fonksiyonları üstel dağılımlı olarak kullanılırsa 0 bölgesinin olasılığı

$$\begin{aligned} p_0 = & \int_{\frac{P_1}{(2^{R_1}-1)N_0}}^{\frac{2^{R_2}(2^{R_1}-1)N_0}{P_1}} \int_{\frac{P_2}{(2^{R_1}-1)P_2} - \frac{P_1}{P_2}X_1}^{\frac{(2^{R_1+R_2}-1)N_0}{P_2} - \frac{P_1}{P_2}X_1} e^{-(X_1/\sigma_{1R}^2) - (X_2/\sigma_{2R}^2)} dx_1 dx_2 \\ & + \int_0^{\frac{(2^{R_1}-1)N_0}{P_1}} \int_0^{\frac{(2^{R_2}-1)N_0}{P_2} + \frac{(2^{R_2}-1)P_1}{P_2}X_1} e^{-(X_1/\sigma_{1R}^2) - (X_2/\sigma_{2R}^2)} dx_1 dx_2 \end{aligned} \quad (\text{B.23})$$

olarak yazılır. (B.23)'teki integral hesaplanacak olursa

$$\begin{aligned} p_0 = & 1 - e^{-\frac{(2^{R_1}-1)N_0}{\sigma_1^2 P_1}} + \frac{e^{-\frac{(2^{R_2}-1)\sigma_1^2 P_1}{\sigma_2^2 P_2}}}{\frac{(2^{R_2}-1)N_0}{\sigma_2^2 P_2} + 1} \left( e^{-\frac{(2^{R_1}-1)N_0}{\sigma_1^2 P_1} \left( \frac{(2^{R_2}-1)N_0}{\sigma_2^2 P_2} + 1 \right)} - 1 \right) \\ & + \frac{e^{-\frac{2^{R_2}(2^{R_1}-1)N_0}{\sigma_1^2 P_1}}}{\frac{(2^{R_1+R_2}-1)N_0}{\sigma_2^2 P_2} + 1} \left( e^{-\frac{(2^{R_1}-1)N_0}{\sigma_1^2 P_1} \left( \frac{(2^{R_1+R_2}-1)N_0}{\sigma_2^2 P_2} + 1 \right)} - e^{-\frac{\sigma_1^2 P_1}{(2^{R_1}-1)\sigma_2^2 P_2} \left( \frac{(2^{R_1+R_2}-1)N_0}{\sigma_2^2 P_2} + 1 \right)} \right) \\ & + e^{-\frac{N_0}{\sigma_2^2 P_2}} \left( \frac{(2^{R_1}-1)N_0}{\sigma_1^2 P_1} - \frac{\sigma_1^2 P_1}{(2^{R_1}-1)\sigma_2^2 P_2} \right) \end{aligned} \quad (\text{B.24})$$

sonucu elde edilir. (B.24)'e ilişkin dikkat edilmesi gereken nokta (B.23) integrali hesaplanırken ilk integralin üst sınırı olan  $(P_1/P_2)X_1$  için tez boyunca kullanılan  $P_1 = P_2$  bilgisinin kullanıldığıdır. Çünkü söz konusu sınır için  $P_1 = P_2$  süreksizlik noktasıdır ve integralin çözümünü etkilemektedir.  $P_1 \neq P_2$  alınması durumunda (B.24)'teki son toplamsal terimin tekrar hesaplanması gerekmektedir.

Son olarak  $p_0, p_{01}, p_{10}$  ve  $p_1$  olasılıkları toplamının 1'e eşit olduğu bilgisi altında 1 bölgesinin olasılığı

$$p_1 = 1 - (p_0 + p_{01} + p_{10}) \quad (\text{B.25})$$

şeklinde elde edilir.

(B.19), (B.20), (B.24) ve (B.25)'te verilen  $p_0$ ,  $p_{01}$ ,  $p_{10}$  ve servis dışı kalma olasılık hesapları 5. Bölüm'deki eş – zamanlı iletişim sistemlerinde tüm  $T_1$ -R,  $T_2$ -R,  $T_1$ -D ve  $T_2$ -D arası kanallar için doğru iletim hızı, gücü ve kanal söndürme katsayılarının kullanılması kaydıyla geçerlidir.

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad** : Sinan ATAN  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Antalya – 09/09/1987  
**E-Posta** : sinanatan@hotmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2005 – 2010, İstanbul Teknik Üniversitesi,  
Elektrik – Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2010 – , İstanbul Teknik Üniversitesi,  
Elektrik – Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

|                              |                                       |             |
|------------------------------|---------------------------------------|-------------|
| Solution Architect           | Ericsson Araştırma ve Geliştirme A.Ş. | 2014 –      |
| Integration Engineer         | Ericsson Araştırma ve Geliştirme A.Ş. | 2011 – 2013 |
| Editör (Yarı – Zamanlı)      | www.PCLabs.com.tr                     | 2008 – 2011 |
| Avea Kırmızı Kuşak, Finalist |                                       | 2010        |