



## YÜRÜYEN DALGALI TÜP KUVVETLENDİRİCİLERİNDE İLETİM SABİTLERİNİN İNCELENMESİ

Agâh Oktay ERTAY<sup>1,2</sup>, Serkan ŞİMŞEK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

<sup>2</sup> Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Erzincan, Türkiye

### Anahtar Kelimeler

Demet-Dalga Etkileşimi,  
Pierce Teorisi,  
Yürüyen Dalgalı Tüpler  
(YDT'ler),  
YDT İletim Sabitleri,  
Uzay Yükü.

### Öz

Bu çalışmada tipik bir yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricisindeki (TWT) elektron demeti ile elektromanyetik dalganın etkileşimi sonucu elde edilen TWT iletim sabitlerinin davranışı incelenmiştir. Öncelikle, TWT demet dalga etkileşiminden dispersiyon denklemi çıkarılmıştır. Elde edilen denklem, Pierce normalizasyon parametreleri kullanılarak basitleştirilmiştir. Farklı Pierce normalizasyon parametre takımları için TWT'ye ait tüm dalga tipi çözümlerin davranışları TWT'nin artırılmış iletim sabitlerine bakılarak tespit edilmiştir. Bu bağlamda üç ana durum ele alınmıştır. Bu üç ana durumun her birinde sırasıyla sadece senkronizasyon, uzay yükü ve devre kaybı parametreleri belirli bir değer aralıklarında süpürülmüştür ve ilgili diğer normalizasyon parametreleri sabit alınmıştır. Böylece TWT'deki dalga tipi çözümlerin artırılmış iletim sabitlerinin kök-yer eğrileri derinlemesine incelenmiştir.

## INVESTIGATION OF PROPAGATION CONSTANTS IN TRAVELING WAVE TUBE AMPLIFIERS

### Keywords

Beam-Wave Interaction,  
Pierce Theory,  
Traveling Wave Tubes  
(TWT's),  
TWT Propagation  
Constants,  
Space Charge.

### Abstract

In this study, behavior of TWT propagation constants obtained from interaction of electron beam and electromagnetic wave in a typical traveling wave tube amplifiers is analyzed. First of all, dispersion equation is derived from TWT beam-wave interaction. Acquired equation is simplified by using Pierce normalization parameters. Behaviors of all wave-type solutions related to TWT are determined for different Pierce normalization parameter sets by looking incremental propagation constants of TWT. In this context, three main cases are considered. In each of three main cases, only synchronization, space charge and circuit loss parameters are swept in a certain value range and other related normalization parameters are taken constant, respectively. Hence, root-locus curves of incremental propagation constants of wave type solutions in TWT are deeply analyzed.

### Alıntı / Cite

Ertay, A. O., Şimşek, S., (2019). Yürüyen Dalgalı Tüp Kuvvetlendiricilerinde İletim Sabitlerinin İncelenmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 7(4), 715-724.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. O. Ertay, 0000-0001-6791-0947  
S. Şimşek, 0000-0003-0964-2176

### Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	27.12.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	10.05.2019
Kabul Tarihi / Accepted Date	15.05.2019
Yayın Tarihi / Published Date	19.12.2019

### 1. Giriş

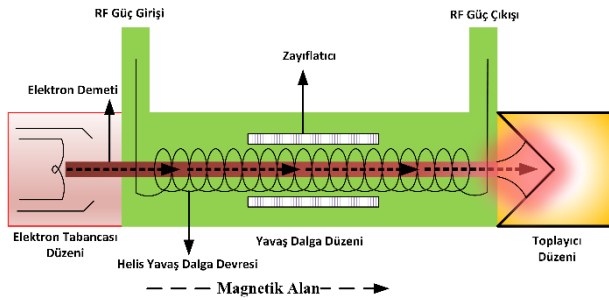
Bir bilgi işaretinin arzu edilen bir noktadan istenen bir noktaya gönderilme ihtiyacı haberleşme sistemlerinin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Bu noktada bir

haberleşme sisteminde temelde verici, alıcı ve iletim ortamından oluşan üç ana sistem yer almaktadır. Bu üç ana sistem içerisinde verici işaretinin alıcı noktasına kayıpsız ve verimli bir şekilde iletilmesine katkı sağlayan işaret kuvvetlendirici sistemleri

\* İlgili yazar/ Corresponding author : aoertay@itu.edu.tr, +90-212-285-7400

bulunmaktadır. Günümüzde özellikle haberleşme uyduları için işaret kuvvetlendirmesini gerçekleştiren Katı Hal Güç Kuvvetlendiricileri (Solid State Power Amplifiers-SSPA) ve Yürüyen Dalgalı Tüp Kuvvetlendiricileri (Traveling Wave Tube Amplifiers-TWTA) bulunmaktadır (Pierce, 1950; Gilmour 1994; Gilmour 2011; Basu, 1996; Kesari ve Basu 2018). Teknolojik olarak birbiri ile sürekli rekabet içinde bulunan bu sistemlerin içerisinde TWTA'lar, haberleşme uydularında SSPA'lara göre özellikle yüksek frekanslarda daha yüksek çıkış gücü ve verimlilik sağlayabildiklerinden dolayı (Qiu vd. 2009) oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

1940'lı yıllardan beri vakum tabanlı bir güç kuvvetlendiricisi olarak kullanılan TWTA'larda Şekil 1'de görüldüğü gibi üç ana çalışma düzeni bulunmaktadır. Her biri oldukça karmaşık çalışma düzenine sahip bu üç ana düzenden biri olan elektron tabancası RF işaretin etkileşime gireceği elektron demetinin uygun biçimde oluşturulmasını ve sisteme uygulanmasını sağlamaktadır. Sisteme verilen elektron demeti ile RF giriş işaretinin istenilen aksel mesafede uygun koşullarda etkileşerek RF işaret çıkışından alınmasını sağlayan yavaş dalga düzeni sistemin ikinci ana çalışma düzenini oluşturmaktadır. Sistemde enerjisi azalmış elektronların RF çıkış işaretine pozitif katkı yapacak ölçüde (yüksek verimde) toplanmasını sağlayan mekanizma toplayıcı düzendir.



**Şekil 1.** Bir Yürüyen Dalgalı Tüp (TWT) sisteminin genel görünümü.

Bir TWTA sisteminde yavaş dalga düzenindeki işaret kuvvetlendirme mekanizmasının anlaşılması ve gerekli çalışma isterlerine ulaşmak için uygun parametrelerin seçimi haberleşme sisteminin verimli kullanılması açısından oldukça gereklidir. Bu doğrultuda elektron demeti ile helis yavaş dalga devresindeki elektromanyetik dalganın yavaş dalga düzeni içerisindeki etkileşiminin matematiksel olarak irdelenmesi büyük önem arz etmektedir. TWT çalışma mekanizmasında küçük işaret seviyesinde Demet-Dalga etkileşiminde dispersiyon denkleminin çözümünü içeren bu durum birçok çalışmada incelenmiştir (Pierce, 1947; Birdsall ve Brewer 1954; Brewer ve Birdsall 1957; Booske ve Converse 2004; Wong vd. 2018; Qiu vd.2018). Bu çalışmalarda basit formdaki bir TWT'deki dispersiyon denklemi çözülmüş ve elde edilen dalga çözümlerinin TWT

kazanç performansına etkileri ele alınmıştır. Bununla beraber, artırılmış iletim sabitlerinin genel davranışlarının (Pierce, 1947; Birdsall ve Brewer 1954; Brewer ve Birdsall 1957; Ertay ve Şimşek, 2017) incelendiği çalışmalarda, çözülen kompleks köklerin yer aldığı kök-yer eğrilerinin çıkarımı ve genel davranışlarının detaylı incelenmesine yeterince girilmemiştir. Bu araştırma makalesinde yeni bir bakış açısı ile bu eksiklikleri giderecek detaylı bir inceleme yapılarak literatüre bu noktada katkı sağlanmıştır. Bu kapsamda, öncelikle, tek helisli TWT'lerde meydana gelen Demet-Dalga etkileşimi mekanizmasının ve literatürde yer alan Pierce normalizasyon parametrelerinin ( $QC, b, d$ ) Demet-Dalga etkileşimine etkisinin araştırılması yapılmıştır. Temel kabuller altında problem basit bir biçime indirgenerek çözümler yapılmıştır. Demet-Dalga etkileşimini içeren dispersiyon denklemi verilmiştir. Çözümlerden elde edilen dalgaların kökleri incelenerek davranış tipleri belirlenmiştir. Her bir Pierce parametre takımı belirli aralıkta serbest bırakılıp, serbest bırakılan parametre dışındaki normalizasyon parametreleri sabit alınarak dispersiyon denkleminde elde edilen köklerin davranışı incelenmiştir. Elde edilen kompleks köklerin kök-yer eğrileri çıkarılmıştır ve farklı Pierce parametreleri için kök-yer eğrilerinden köklerin davranışları incelenmiştir.

İlerleyen bölümlerde lineer bölgede ele alınan temel düzeyde bir TWT'nin Demet-Dalga etkileşimi sonucunda ortaya çıkan iletim sabitlerinin davranışı ve kök-yer eğrilerinin değişimi detaylı olarak incelenmiş, sonuçlar ve değerlendirmeler verilmiştir.

## 2. TWT Demet-Dalga Etkileşim Denklemi

Tipik bir TWT'de meydana gelen Demet-Dalga etkileşiminin incelenmesi için öncelikle ele alınacak koşulların basitleştirilmesi gereklidir. Bu doğrultuda aşağıda belirtilen temel varsayımlar dikkate alınmalıdır (Pierce, 1947; Ertay ve Şimşek, 2017):

- Elektron demeti hareketinin sadece aksel yönde ve düzgün bir forma sahip olduğu kabul edilmiştir.
- Elektron demet hızının ışık hızından görece küçük olduğu kabul edilmiştir.
- Elektron demet hızının alternatif akım bileşenlerinin doğru akım bileşenlerine göre oldukça küçük olduğu kabul edilmiştir.

Analizi basitleştirici bu kabuller ile birlikte,  $e^{j\omega t - \Gamma z}$  ( $\omega$ : açısal frekans ve  $\Gamma$ : TWT iletim sabiti) zaman bağımlılığı dikkate alınmıştır. TWT'nin yavaş dalga düzeninde bulunan yavaş dalga devresi ile elektron demetinin etkileşimi birbirine yakın olan iletim hattı devresi ile elektron demetinin etkileşimi olarak ele alınmıştır (Pierce, 1947). Bu durumda Demet-Dalga etkileşiminin uygun analizi açısından ortaya iki durum çıkmaktadır. Uzay yükü etkilerinin olmadığı varsayımı altında, yavaş dalga devresinin elektronların hareketini etkilediği aksel elektrik alan ( $E_{eks}$ ) bir

durumu (devre denklemi), aksenal elektrik alandan kaynaklanan elektron demetindeki aksenal akım ( $i_{eks}$ ) diğer durumu (elektronik denklemi) meydana getirmektedir. Matematiksel çıkarımlarına detaylı olarak (Pierce, 1950; Gilmour 1994; Gilmour 2011; Basu, 1996; Pierce, 1947; Ertay ve Şimşek, 2017) literatürde yer verildiği devre ve elektronik denklemleri sırasıyla eşitlik (1) ve (2)'de ifade edilmektedir.

$$E_{eks} = \frac{\Gamma^2 \Gamma_0 Z_0}{\Gamma_0^2 - \Gamma^2} i_{eks} \quad (1)$$

$$i_{eks} = \frac{j\beta_e I_0}{2V_0(j\beta_e - \Gamma)^2} E_{eks} \quad (2)$$

Eşitlik (1) ve (2)'de yer alan  $\Gamma$ ,  $\Gamma_0$ ,  $Z_0$ ,  $I_0$ ,  $V_0$  ve  $\beta_e$  ifadeleri sırasıyla TWT iletim sabiti, eşdeğer iletim hattı devresi ile modellenen yavaş dalga devresinin iletim sabiti ve karakteristik empedansı, dc demet akımı, elektronların hızlandırılmasını sağlayan dc demet gerilimi ve elektronların faz sabitini göstermektedir. Elektron demetinin faz sabiti  $\omega/u_0$  ile ifade edilmekte olup ( $u_0 = 5.93 \times 10^5 \sqrt{V_0}$  m/s) ortalama elektron hızıdır ve demet gerilimine bağlıdır.

Uzay yükü etkilerinin olmadığı durumda eşitlik (1) ve (2) ifadeleri  $i_{eks}$  ile  $E_{eks}$  arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarmaktadır. Bu iki denklemin bu koşullar altında bir araya getirilmesi sonucu (3) no'lu dördüncü dereceden genel denklem elde edilmektedir.

$$\frac{j\beta_e I_0 Z_0 \Gamma^2 \Gamma_0}{2V_0(\Gamma_0^2 - \Gamma^2)(j\beta_e - \Gamma)^2} = 1 \quad (3)$$

Elektron demetinin elektron tabancasından çıkıp yavaş dalga düzenini geçmesinden sonra yavaş dalga devresi ile etkileşime başlaması sonucunda oluşan kümelenmiş elektron demetinin yükü yavaş dalga devresinde ilerleyen dalganın oluşturduğu elektrik alana ek bir elektrik alan getirmektedir. Bu durumda eşitlik (2)'de uzay yükü etkilerinden kaynaklanan elektrik alanın dikkate alınması ile ve detaylı matematiksel işlemler sonucunda (Pierce, 1947; Gilmour, 1994; Gilmour, 2001, Ertay, 2017) eşitlik (4)'teki gibi bir Demet-Dalga etkileşim denklemi elde edilmektedir.

$$\frac{j\beta_e I_0 \Gamma}{2V_0(j\beta_e - \Gamma)^2} \left[ \frac{Z_0 \Gamma \Gamma_0}{2(\Gamma_0^2 - \Gamma^2)} - \frac{j\Gamma}{\omega C_1} \right] = 1 \quad (4)$$

(4) no'lu dispersiyon denkleminde eşitliğin sol tarafındaki ikinci terim uzay yükü etkilerinin oluşturduğu katkıyı göstermektedir. (4) no'lu eşitlikte yer alan  $C_1$  ifadesi eşdeğer iletim hattı ile modellenen yavaş dalga devresi ile elektron demeti arasında oluşan birim uzunluktaki kapasiteyi göstermektedir (Pierce, 1950; Gilmour, 1994; Ertay ve Şimşek, 2017). Uzay yükü etkileri de dikkate alınarak, ifadelerin daha basit ve anlaşılabilir bir formda açıklanması açısından bazı normalizasyon parametreleri

kullanılmıştır. Buna göre, eşitlikler (5)'de, (6)'da ve (7) ile (8)'de TWT terminolojisinde sıkça kullanılan Pierce normalizasyon parametreleri ( $Q, b, d$ ) (Pierce, 1950; Gilmour 1994; Gilmour 2011; Basu, 1996; Pierce, 1947; Ertay ve Şimşek, 2017) yer almaktadır.

$$Q = \frac{\beta_e}{2\omega C_1 Z_0} \quad (5)$$

$$C = \left( Z_0 \frac{I_0}{4V_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$b = \frac{\left( \frac{u_0}{v_f} - 1 \right)}{C} \quad (7)$$

$$d = \frac{\alpha}{\beta_e C} \quad (8)$$

Eşitlik (5)'te, (6)'da, (7)'de ve (8)'de yer alan  $v_f$ ,  $\alpha$ ,  $Q$ ,  $C$ ,  $b$ , ve  $d$  ifadeleri sırasıyla yavaş dalga devresine ait faz hızı ve zayıflama sabiti, uzay yükü parametresi, kazanç parametresi, demet ve dalga hızı arasındaki senkronizasyon parametresi ve devre kayıp parametresidir.  $v_f$ , yavaş dalga düzeninde kullanılan yavaş dalga devresinin elektron demeti mevcut değilken (soğuk analiz), alan analizlerinden (Jain vd., 1987; Jain vd., 1992; Ghosh vd., 1997; D'Agostino vd., 1998; Ertay ve Şimşek 2018) veya üç boyutlu elektromanyetik benzetim ortamlarında yavaş dalgalı yapı modellenmesi yapılarak elde edilebilecek dispersiyon ilişkisinden ortaya konabilen bir büyüklüktür. Pierce kazanç parametresi  $C$  elektron demeti ile yavaş dalga devresi arasındaki etkileşim yoğunluğunun ölçüsünü göstermektedir. Tipik bir TWT için kazanç parametresi  $C \ll 1$  mertebelerinde olabilmektedir. Birbiri ile etkileşim halindeki elektron demetinin ve elektromanyetik dalganın hızlarının aynı olduğu durum senkron durumu ifade etmektedir ve bu durum eşitlik (7)'de  $u_0/v_f$  oranının 1 olmasına karşılık düşer böylece hız senkronizasyon parametresi 0'a eşit olmaktadır. Bu durumda yavaş dalga devresi ile elektron demeti faz sabitleri arasında  $\beta_0 = \beta_e$  eşitliği yazılabilmektedir. Elektron demetinin ve elektromanyetik dalganın hızlarının farklı olduğu durum senkron olmayan durumu ifade etmektedir ve bu durumda ilgili faz sabitleri arasında  $\beta_0 = \beta_e(1 + Cb)$  ilişkisi yazılabilmektedir. Yavaş dalga devresinin zayıflama sabitinin  $\beta_e C$  çarpımına oranı kayıp parametresini vermektedir. TWT'nin iletim sabitlerinin genel olarak bulunabilmesi için Pierce artırılmış iletim sabiti yaklaşımını öne sürmüştür (Pierce, 1947). Buna göre, birbirileri ile etkileşimde olan Demet-Dalga mekanizmasında oluşan TWT iletim sabiti  $\Gamma$  eşitlik (9)'da verilmiştir. Eşitlik (9) senkron, senkron olmayan durum ve devre zayıflaması gibi tüm durumları içeren iletim sabitlerini ifade etmektedir.

$$\Gamma = j\beta_e - \beta_e C \delta \quad (9)$$

Eşitlik (9)'da yer alan  $\delta$ , eşitlik (10)'da belirtilmiş olup, TWT'nin her bir dalga çözümüne ait artırılmış iletim sabiti bileşenlerini göstermektedir.

$$\delta = x_n + jy_n, \quad n = 1, 2, 3 \quad (10)$$

Yavaş dalga devresi iletim sabiti  $\Gamma_0$  eşitlik (11)'deki gibi yazılabilmektedir.

$$\Gamma_0 = j\beta_e + j\beta_e Cb + \beta_e Cd \quad (11)$$

Eşitlik (5)'te, (6)'da, (7)'de, (8)'de, (9)'da ve (11)'de yer alan ifadeler (4) no'lu eşitlikte yerine yazıldığında ve  $C \ll 1$  kabulü dikkate alındığında eşitlik (12)'de yer alan üçüncü dereceden denklem elde edilmektedir.

$$(j)\delta^3 + (b - jd)\delta^2 + (j4QC)\delta + ((-1 - 4QCb) + j4QCd) = 0 \quad (12)$$

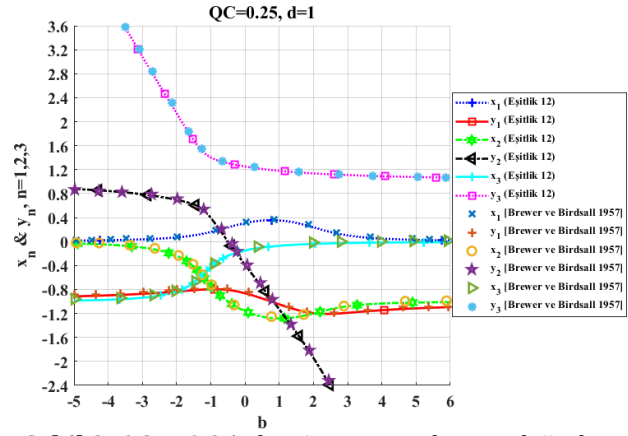
Eşitlik (12)'nin çözümleri eşitlik (10)'daki kompleks kökleri vermektedir. Eşitlik (12)'de verilen  $QC$  çarpımı elektronlar üzerindeki genleşme kuvvetlerinin kümelenme kuvvetlerine bağlı mukavemetinin ölçüsü olarak kabul edilmektedir ve uzay yükü etkilerini içermektedir (Gilmour, 1994). Ek olarak, adı geçen aynı eşitlik demet-dalga hız ilişkisini ve yavaş dalga devresinin zayıflama etkilerini de içermektedir. Eşitlik (9)'da belirtilen TWT iletim sabiti,  $e^{j\omega t - \Gamma z}$  dalga tanımında yerine yazıldığında eşitlik (13) elde edilmektedir.

$$e^{j\omega t - \Gamma z} = e^{j\omega t} e^{j\frac{\omega}{u_0} Cx_n} z e^{-j\left[\frac{\omega}{(1-Cy_n)}\right]z} \quad (13)$$

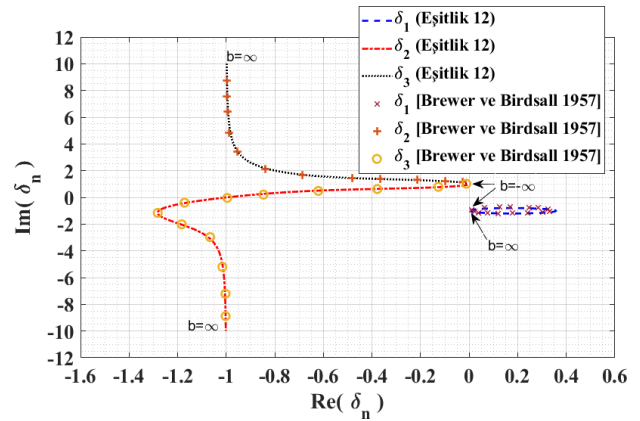
Eşitlik (13)'te de görüleceği üzere, elde edilen kompleks çözümlerin reel kısımları TWT'de ortaya çıkan dalgaların genliğinin davranışı hakkında bilgi vermekte olup, sanal kısımları ise aynı dalga çözümlerine ait hızların elektron demet hızından ne kadar farklı olduğunun ölçüsünü belirtmektedir. Eşitlik (12)'den elde edilen kompleks köklerin eşitlik (13)'te verilen genlik ve faz ifadelerine etkisi  $b$ ,  $d$  ve  $QC$  parametrelerinin farklı değerleri için belirlenebilmektedir.

### 3. Sayısal Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu bölümde eşitlik (12)'nin Pierce parametrelerinin mümkün olabilecek farklı durumları için çözümleri yer almaktadır. Öncelikle, üçüncü dereceden TWT dispersiyon denklemi eşitlik (12)'nin  $QC = 0.25$  ve  $d = 1$  ve  $-\infty < b < \infty$  değerleri için elde edilen sonuçlar ile literatürde mevcut aynı durum için dördüncü dereceden TWT dispersiyon denkleminin çözümünden elde edilen sonuçlar [Brewer ve Birdsall, 1957] Şekiller 2 ve 3'teki gibi karşılaştırılmıştır. Eşitlik (12)'nin çözümü ile elde edilen artırılmış iletim sabitlerine ait reel ve sanal kısımlara ait çözümlerin literatürde verilen sonuçlar ile mükemmel bir uyuma sahip olduğu Şekiller 2 ve 3'ten açıkça görülmektedir.

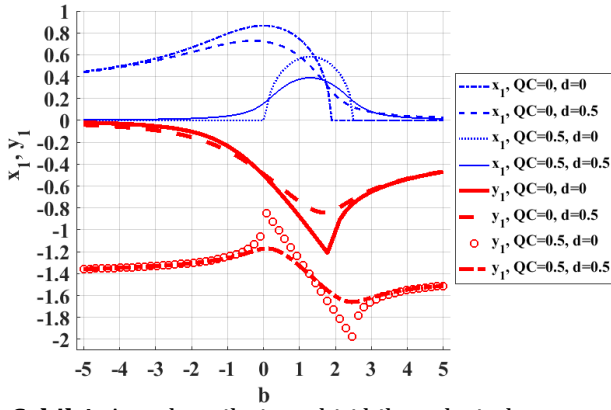


Şekil 2.  $QC = 0.25$ ,  $d = 1$  ve  $-\infty < b < \infty$  değerleri için eşitlik (12) ve literatüre ait reel ve sanal kısımlara ilişkin çözümlerinin karşılaştırılması.



Şekil 3.  $QC = 0.25$ ,  $d = 1$  ve  $-\infty < b < \infty$  değerleri için eşitlik (12) ve literatüre ait  $\delta$  düzleminde çözümlerin karşılaştırılması.

Eşitlik (12)'nin çözümü literatür ile doğrulandıktan sonra dört farklı durum için Şekil 4-9'da ele alınmıştır. Bu dört farklı durumdan ilki uzak yükü etkilerinin ve devre kaybının olmadığı durumu ( $QC = 0$ ,  $d = 0$ ), ikincisi sadece devre kaybı etkilerinin dikkate alındığı durumu ( $QC = 0$ ,  $d = 0.5$ ), üçüncüsü sadece uzay yükü etkilerinin dikkate alındığı durumu ( $QC = 0.5$ ,  $d = 0$ ), son durum ise her iki etki mekanizmalarının da dikkate alındığı durumu ( $QC = 0.5$ ,  $d = 0.5$ ) ifade etmektedir. Her bir durumun artırılmış iletim sabitlerinin davranışını içeren sonuçlar Şekil 4-9'da verilmektedir.



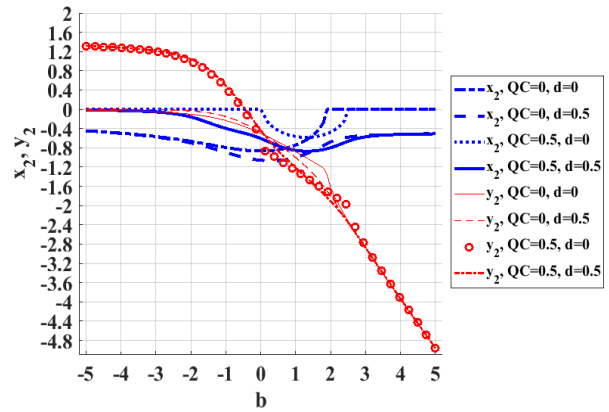
**Şekil 4.** Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinden artan ileri dalga bileşenlerinin farklı QC, d değerleri için senkronizasyon parametresine göre değişimi.

Şekil 4'de, açıklanan dört farklı durumu içeren kompleks kök çözümlerinden biri verilmektedir. Buna göre, dört farklı durum için elde edilen kompleks çözümün reel kısmı, seçilen  $b$  değerlerinde daima sıfırdan büyük olmaktadır. Şekil 4'de bulunan  $x_1$  değerleri eşitlik (13)'te yerine konursa elde edilen dalga tipi çözümünün artan dalga olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, elde edilen kompleks çözümün sanal kısmı seçilen  $b$  değerlerinde daima sıfırdan küçüktür. Bulunan  $y_1$  değerleri eşitlik (13)'te yerine konursa elde edilen dalga tipi çözümünün elektron demeti ile aynı yönde ve ortalama elektron hızından yavaş olduğu görülmektedir. Sonuç olarak artan ileri dalga bileşeni bulunmuş olmaktadır. Ayrıca farklı dört durum için Şekil 4 incelendiğinde uzay yükü parametresi  $QC$ 'nin  $x_1$ 'i belirli bir  $b$  değer aralığında sınırladığı ve artan ileri dalganın hızını da eşitlik (13) incelenirse düşürdüğü görülmektedir. Devre kaybının mevcut olması çözümün reel kısmı değerini düşürmektedir (Pierce, 1950; Gilmour, 1994; Gilmour 2011; Basu, 1996; Pierce, 1947; Ertay ve Şimşek, 2017) ve bu durum artan ileri dalga karakteristiğine negatif katkı sunmaktadır.

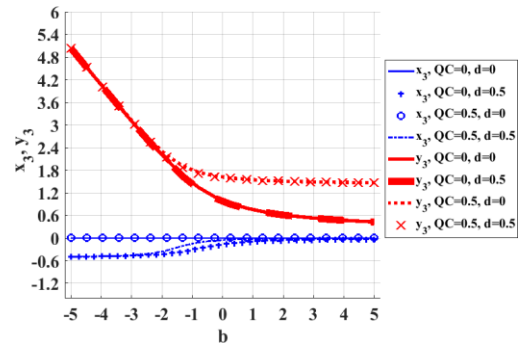
Şekil 5'te eşitlik (12)'nin çözümünden elde edilen bir diğer kompleks kök çözümü görülmektedir. Şekil 5'te görülmektedir ki, dört farklı durum için elde edilen kompleks kökün reel kısmı seçilen  $b$  değerlerinde daima sıfırdan küçük olmaktadır. Bu durumda elde edilen  $x_2$  eşitlik (13)'te yerine yazıldığında ele alınan dalga tipi çözümün azalan dalga olduğu görülmektedir. Bunun yanında,  $b$ 'nin çok küçük değerleri için  $y_2$  değerlerinin pozitif bir sabite yakınsadığı ve  $b$ 'nin çok büyük değerleri için  $y_2$  değerlerinin oldukça düşmekte olduğu görülmektedir. Eşitlik (13) 'te ilgili bu kompleks kökün sanal kısmı yerine konduğunda elde edilen dalga tipi çözümün elektron demeti ile aynı yönde ve elektron demet hızından daha yavaş olduğu görülmektedir (Pierce, 1947; Gilmour, 1994; Gilmour 2011; Basu, 1996; Pierce, 1947; Ertay ve Şimşek, 2017).

Şekil 6'da eşitlik (12)'nin çözümünden gelen son kompleks kökün reel ve sanal kısımlarının değişimi

verilmektedir. Şekil 6'da açıkça görülmektedir ki, dört farklı durum için elde edilen kompleks kökün reel kısmının seçilen  $b$  değerleri için ciddi oranda değişmediği görülmektedir. Elde edilen bu durum eşitlik (13)'te yerine konursa kompleks kökü elde edilen dalga tipi çözümün genliğinin zayıflamadığı görülmektedir. Dört farklı durum için elde edilen kompleks çözümün sanal kısmı ise seçilen  $b$  değer aralığında daima pozitifdir. Eşitlik (13)'te bu durum yerine konursa elde edilen dalga tipi çözümün hızının elektron demeti hızından daha büyük olduğu görülmektedir (Pierce, 1947; Gilmour, 1994; Gilmour 2011; Basu, 1996; Pierce, 1947; Ertay ve Şimşek, 2017).



**Şekil 5.** Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinden azalan ileri dalga bileşenlerinin farklı QC, d değerleri için senkronizasyon parametresine göre değişimi.



**Şekil 6.** Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinden zayıflamayan ileri dalga bileşenlerinin farklı QC, d değerleri için senkronizasyon parametresine göre değişimi.

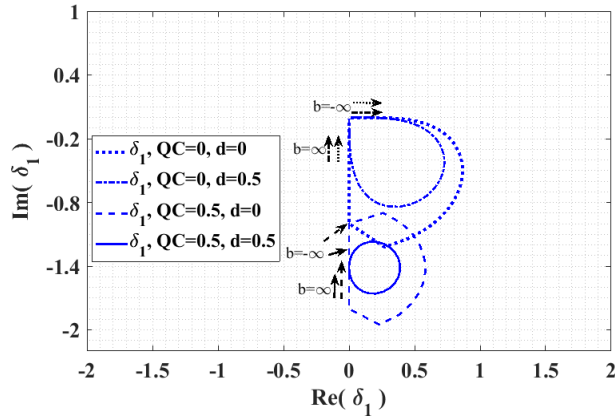
Eşitlik (12) 'nin dört farklı durum için çözümü sonucu çıkan üç kompleks kökün kök-yer eğrileri Şekil 7-9'da verilmektedir. Dalga tipi çözümlerin yorumlanması açısından kök-yer eğrilerinin konumları aşağıdaki gibi değerlendirilebilmektedir:

- $Re(\delta_n) > 0, Im(\delta_n) > 0 \Rightarrow I. Bölge$
- $Re(\delta_n) < 0, Im(\delta_n) > 0 \Rightarrow II. Bölge$
- $Re(\delta_n) < 0, Im(\delta_n) < 0 \Rightarrow III. Bölge$
- $Re(\delta_n) > 0, Im(\delta_n) < 0 \Rightarrow IV. Bölge$

I. bölgede olabilecek kökler eşitlik (13) için yerine konursa, ilgili çözümler artan ya da zayıflamayan dalga olabilir ve bu dalganın hızı elektronların hızından büyüktür. II. bölgede olabilecek kökler eşitlik



(13) için yerine konursa, ilgili çözümler azalan ya da zayıflamayan dalga olabilir ve bu dalganın hızı elektronların hızından büyüktür. III. Bölgede olabilecek kökler eşitlik (13) için yerine konursa, ilgili çözümler azalan ya da zayıflamayan olabilir ve bu dalganın hızı elektronların hızından küçüktür. IV. bölgede olabilecek kökler eşitlik (13) için yerine konursa, ilgili çözümler artan ya da zayıflamayan dalga olabilir ve bu dalganın hızı elektronların hızından küçüktür. Şekil 7'de dört farklı durum için elde edilen artan ileri dalgaya ait artırılmış iletim sabiti bileşenlerinin kök-yer eğrileri verilmektedir. Şekil 7'de görülmektedir ki, olabildiğince geniş ölçekteki  $b$  değer aralığı için  $(-\infty < b < \infty)$  kök-yer eğrilerinin dört farklı durum için de kendi üzerine kapandığı görülmektedir. Devre kaybı parametresinin artması geniş ölçekteki  $b$  değer aralığı için kök yer eğrilerinin bir noktadan başlayıp aynı noktada daha dar bir değer aralığı bölgesinde sınırlandırılmış göstermektedir. Sadece uzay yükü etkilerinin artması artan ileri dalga kök-yer eğri karakteristiğinin  $\delta$  düzleminde sanal eksen boyunca negatif yönde kaymasına yol açmaktadır. Ek olarak, Şekil 7'de dört farklı durum için elde edilen kök çözümünün sürekli IV. bölgede bulunduğu görülmektedir ve bu durum elde edilen çözümün artan ileri dalga ( $\delta_1$ ) olduğunu doğrulamaktadır.

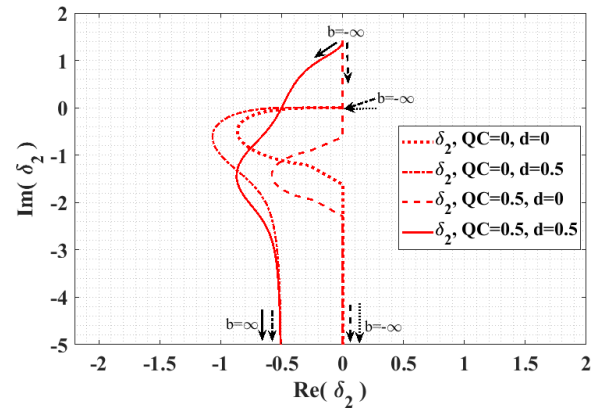


**Şekil 7.** Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinden artan ileri dalga bileşenlerinin farklı  $QC, d$  değerleri için kök-yer eğrilerinin senkronizasyon parametresine göre değişimi.

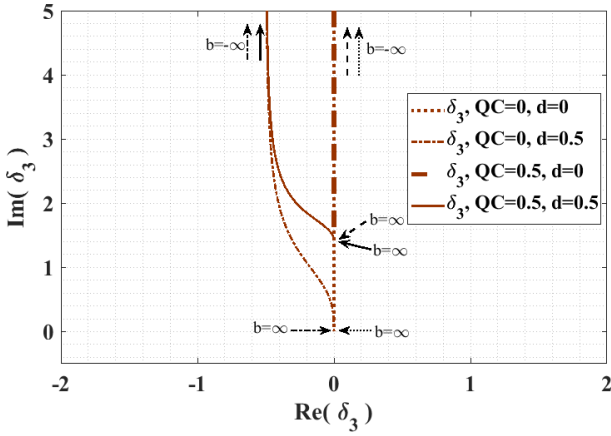
Şekil 8'de eşitlik (12)'nin çözümünden gelen diğer kompleks kökün kök-yer eğrileri yer almaktadır. Şekil 8'deki kök-yer eğrileri göstermektedir ki, kayıp parametresinin artması, kökleri sol yarı  $\delta$  düzlemine kaydırmaktadır. Sadece uzay yükü etkilerinin artması köklerin değişimini  $\delta$  düzleminin sanal eksenine kaydırmaktadır. Ek olarak,  $QC \neq 0$  ve  $d \neq 0$  durumlarında ve negatif  $b$  değerlerinde kökler II. bölgede yer almıştır, bunun haricindeki durumlarda ise kökler III. bölge ve sanal eksen doğrultusunda kalmıştır. Bu doğrultuda, ele alınan çözümün azalan dalga olduğu ve negatif  $b$  değerlerinde dalganın hızı elektron demet hızından küçük, pozitif  $b$  değerlerinde ise büyük olduğu görülmektedir. Genel itibari ile

azalan ileri dalganın ( $\delta_2$ ) III. Bölgede yoğunlaştığı görülmektedir.

Şekil 9'da eşitlik (12)'den elde edilen son çözüm için kök-yer eğri karakteristiğinin dört farklı durum ve farklı  $b$  değerleri için değişimi verilmiştir. Farklı  $b$  değerleri için sadece devre kaybının artması sonucu kökler  $\delta$  düzleminde II. bölgenin soluna doğru kaymıştır ve kompleks kökün reel kısmının sabit bir değere yakınsadığı görülmektedir. Sadece uzay yükü parametresinin artması sonucu saf sanal ekseninde yer alan kökler pozitif sanal eksen yönüne kaymaktadır. Genel itibari ile II. Bölgede ve saf sanal ekseninde yer alan ilgili kompleks kökler neredeyse sabit reel değerlere sahiptir ve bu durum elde edilen dalga çözümünün zayıflamayan ve elektron demetinden hızlı bir dalga olduğunu ( $\delta_3$ ) doğrulamaktadır. Şekil 7-9'da verilen kök-yer eğrilerinin I. bölgede yer almaması artan ya da zayıflamayan ve elektron demetinden hızlı bir ileri dalganın bu problemde oluşmadığını göstermektedir. Şekil 10-12'de yer alan kök-yer eğrilerinde sabit bir senkronizasyon parametresi seçilmiştir ve farklı devre kaybı parametre değerleri için uzay yükü parametresi belirli aralıklarda süpürülerek ilgili köklerin davranışı incelenmiştir. Senkronizasyon parametresi elektron demetinin hızına, yavaş dalga devresinin faz hızına ve Pierce kazanç parametresine bağlıdır. Demet-Dalga etkileşimi esnasında yavaş dalga devresinin faz hızı, ilgili yavaş dalga devresinin dispersiyon karakteristiğine bağlı olarak elektron demet hızından büyük olabilmektedir. Bu sebeple Şekil 10'da  $b$ 'nin negatif durumu için analiz yapılmıştır.



**Şekil 8.** Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinden azalan ileri dalga bileşenlerinin farklı  $QC, d$  değerleri için kök-yer eğrilerinin senkronizasyon parametresine göre değişimi.



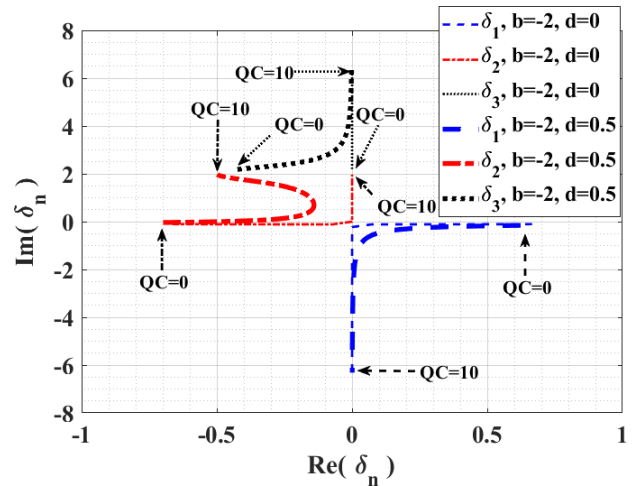
**Şekil 9.** Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinden zayıflamayan ileri dalga bileşenlerinin farklı  $QC$ ,  $d$  değerleri için kök-yer eğrilerinin senkronizasyon parametresine göre değişimi.

Şekil 10'da açıkça görülmektedir ki,  $\delta_1$  ve  $\delta_2$  kayıpsız durumda,  $QC$  değerinin artması ile saf reel değerlerden saf sanal değerlere doğru ilerlemiş ve  $\delta_3$  ise daima sanal eksen üzerinde yer almıştır. Kayıp parametresinin artması  $\delta_1$ 'in karakteristiğinde önemli bir değişiklik meydana getirmemekle beraber,  $\delta_2$ 'nin karakteristiği  $QC$  değerinin artması sonucu saf reelden komplekse doğru ilerlemiştir ve kökler II. bölgede yer almaya başlamıştır. Ortaya çıkan bu sonuç, yüksek  $QC$  değerlerinde azalan ileri dalganın hızının elektron demetinin hızından ele alınan durum için daha yüksek değerlere ulaştığını göstermektedir. Ek olarak, kayıp parametresinin artması  $\delta_3$ 'ün II. bölgeden başlayarak  $QC$ 'nin artması ile saf sanal duruma yakınsadığı görülmektedir.

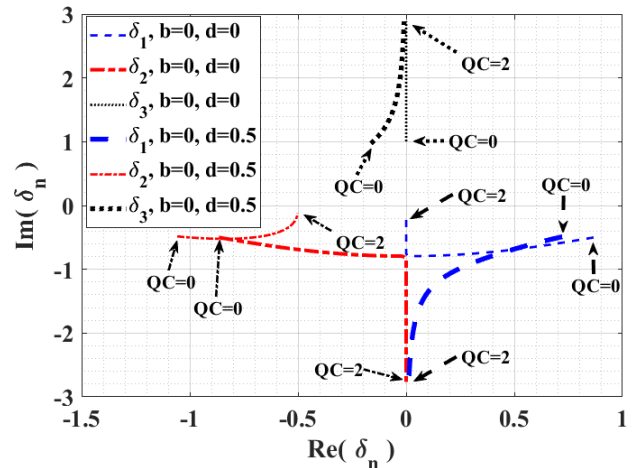
Senkron durumda ( $b = 0$ ) ilgili yavaş dalga devresinin kayıpsız ve kayıplı olduğu durumlar dikkate alınarak  $QC$  parametresinin süpürülmesi ile eşitlik (12) çözülmüştür ve Şekil 11'de verilen kök-yer eğrileri elde edilmiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere,  $\delta_1$  değerleri, kayıpsız durumda  $QC$ 'nin artması ile  $\delta$  düzleminde önce sanal eksene sonra orijine yakınsamıştır. Kayıplı durumda ise  $QC$ 'nin artması ile artan ileri dalgaya ait kökler  $\delta$  düzleminde sanal eksenin negatif değerlerine yakınsamaktadır. Bu durum, artan ileri dalganın hızını eşitlik (13) dikkate alındığında Pierce kazanç parametresine bağlı olarak etkilemektedir. Kayıpsız durumda,  $QC$ 'nin artması ile  $\delta_2$  önce  $\delta$  düzleminin sanal eksenine ilerlemiş ve sonrasında saf sanal olarak negatif sanal eksende ilerlemiştir. Kayıplı durumda ise,  $QC$ 'nin artması sonucunda  $\delta_2$  III. bölgede yer almıştır. Şekil 11'de  $\delta_3$  kökleri, kayıplı ve kayıpsız durumları için Şekil 10'daki benzer davranışı sergilemiştir.

Elektron demet hızının yavaş dalga devresinin faz hızından büyük olduğu herhangi bir durumda senkronizasyon parametresi sıfırdan büyük olmaktadır. Kayıpsız ve kayıplı durumların ele alındığı ve  $QC$ 'nin belirli aralıkta seçildiği Şekil 12'de  $b$  parametresi 1.87 alınmıştır. Şekil 12'de görülmektedir ki,  $\delta_1$  kökleri  $QC$ 'nin artması ile çoğunlukla IV. Bölgede

yoğunlaşmış ve yüksek  $QC$  değerlerinde saf sanal değerlere ulaşmıştır. Yüksek  $QC$  değerleri ve seçilen  $b$  değeri için  $\delta_1$ 'in saf sanal hale gelmesi eşitlik (13) ile birlikte değerlendirilirse, ilgili dalganın sabit genliğe sahip ve hızı elektron demet hızına yaklaşan bir dalga formuna dönüştüğü söylenebilmektedir. Devre kaybının yer aldığı durumda artan ileri dalga benzer şekilde IV. bölgede yoğunlaşmakla birlikte yüksek  $QC$  değerlerinde ilgili dalga sabit genlikli bir forma yakınsayan ve elektron hızından daha yavaş hale gelen bir forma dönüşmektedir. Devre kaybının artması sonucunda Şekil 12'de yer alan  $\delta_2$  köklerinin  $\delta$  düzleminde III. bölgede sola doğru kaydığı görülmektedir. Ek olarak,  $QC$ 'nin artması ve kayıpsız durum için  $\delta_2$  kökleri  $\delta$  düzleminde sanal eksene doğru ilerlemiş ve negatif sanal eksende devam etmiştir. Kayıplı durumda için ise  $QC$ 'nin artması sonucu  $\delta_2$  kökleri Şekil 12'de görüldüğü gibi daima III. bölgede yer almıştır. Şekil 12'deki  $\delta_3$  kökleri ise Şekil 10'daki ve Şekil 11'deki benzer davranışlara sahiptir.

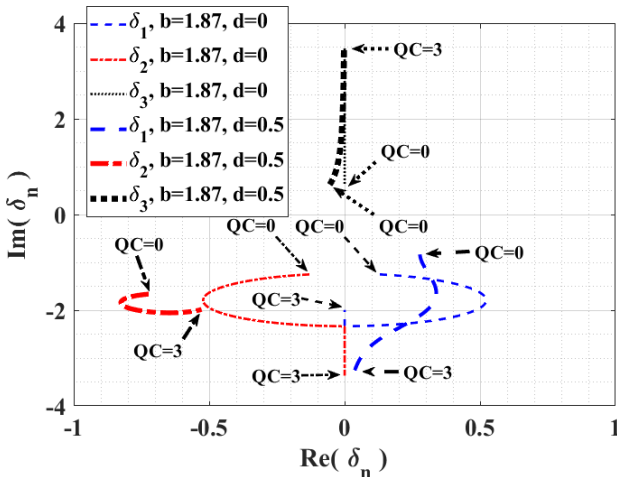


**Şekil 10.** Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinin  $b = -2$  ve farklı  $d$  değerleri için  $QC$  parametresine göre kök-yer eğrilerinin değişimi.



**Şekil 11.** Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinin  $b = 0$  ve farklı  $d$  değerleri için  $QC$  parametresine göre kök-yer eğrilerinin değişimi.

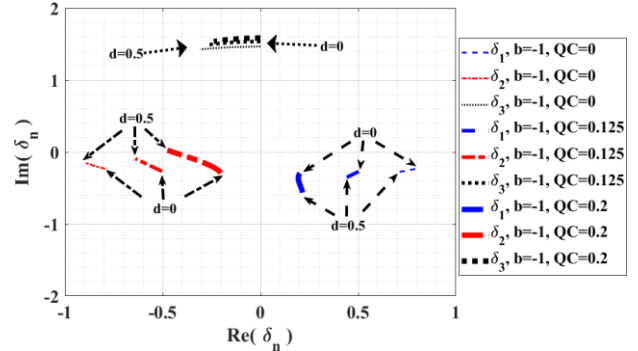
Devre kaybı parametresinin sabit  $b$  ve  $QC$  değerleri için süpürülmesi ile eşitlik (12)'nin çözümü yapılabilmektedir. Bu durum TWT'de devre kaybı her noktada farklı olabilecek yavaş dalga devresinin kullanılmasına karşılık gelebilmektedir. Bu çözüm sonucu elde edilen köklerin kök-yer eğri karakteristikleri Şekil 13-15'te verilmektedir. Genel itibari ile Şekil 13-15'te çıkan tüm kökler oldukça sınırlı değer aralıklarında yer almıştır. Şekil 13'te  $b = -1$  ve farklı  $QC$  değerleri için  $d$  parametresine göre köklerin değişimi görülmektedir. Şekil 13'te görüldüğü üzere,  $\delta_1$  kökleri ele alınan her durum için IV. bölgede yer almış ve  $QC$ 'nin artması ilgili kökleri  $\delta$  düzleminde IV. bölgenin soluna kaydırmıştır.  $\delta_2$  kökleri ise, Şekil 13'te görüldüğü gibi  $QC$ 'nin artması ile  $\delta$  düzleminin orijinine yaklaşmaktadır. Aynı durum için devre kaybının artması  $\delta_2$  köklerinin saf reel değerlere doğru ilerlediğini Şekil 13'te göstermektedir. Şekil 13'teki  $\delta_3$ 'ün davranışı incelendiğinde,  $QC$ 'nin artması ile ilgili köklerin pozitif sanal eksene doğru gittiği ve devre kaybının artması sonucunda ise ilgili kökün reel değerlerinin negatifte gittiği görülmektedir. Senkron durumda farklı  $QC$  parametreleri için devre kaybı parametresinin süpürülerek eşitlik (12)'nin çözümü ile Şekil 14'te verilen kök-yer eğrileri elde edilmiştir. Buna göre, ilgili tüm kök yer eğrileri kendi içlerinde Şekil 13'te sonuçları verilen köklerin davranışına benzer özellikler göstermesine ek olarak,  $QC$ 'nin artması Şekil 13'e göre  $\delta_1$  ve  $\delta_2$  değerlerinin kendi içlerinde küçük değişiklikler oluşturduğu ve  $\delta_3$ 'te ise daha geniş bir değişim aralığı oluşturduğu Şekil 14'te gözlenmiştir.



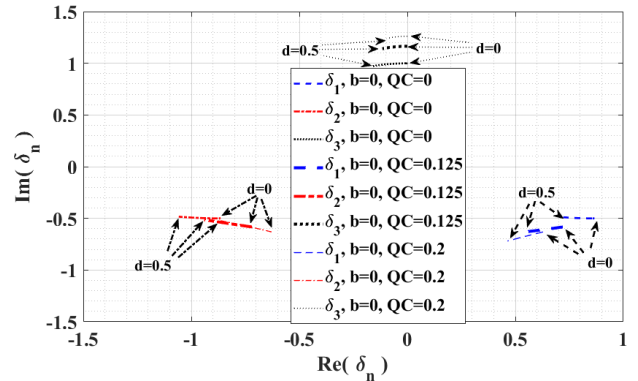
Şekil 12. Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinin  $b = 1.87$  ve farklı  $d$  değerleri için  $QC$  parametresine göre kök-yer eğrilerinin değişimi.

Farklı  $QC$  değerleri ve  $b = 1.88$  ile seçilen  $d$  aralığında eşitlik (12)'nin çözümü sonucu Şekil 15'te verilen kök yer eğrileri elde edilmektedir. Şekil 13 ve Şekil 14'den farklı olarak ele alınan bu durumda  $QC$ 'nin artması sonucu  $\delta_3$ 'ün giderek daralan bir kök-yer eğrisine sahip olduğu görülmektedir. Ek olarak,  $QC$ 'nin artması ve belirli  $d$  aralığı için  $\delta_1$  ve  $\delta_2$  değerlerinin sanal kısmının sabit değerlerde kaldığı Şekil 15'te görülmektedir. Bu durum belirli bir bölgede yer alan  $d$

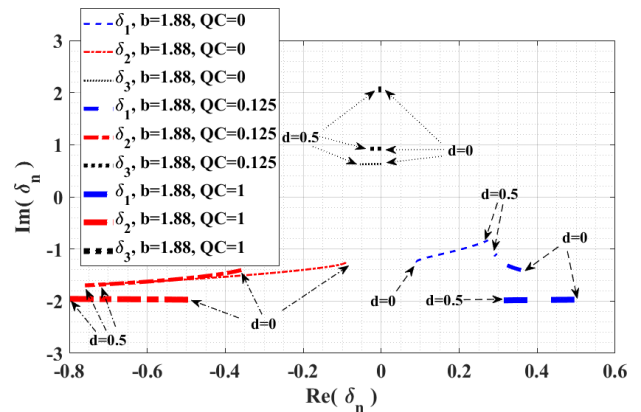
parametre aralığı ve yüksek  $QC$  değerlerinde artan ve azalan dalgaların hızlarının Pierce kazanç parametresine bağlı olarak elektron demetine daha yakın olabildiğini göstermektedir.



Şekil 13. Atrılmış iletim sabiti bileşenlerinin  $b = -1$  ve farklı  $QC$  değerleri için  $d$  parametresine göre kök-yer eğrilerinin değişimi.



Şekil 14. Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinin  $b = 0$  ve farklı  $QC$  değerleri için  $d$  parametresine göre kök-yer eğrilerinin değişimi.



Şekil 15. Artırılmış iletim sabiti bileşenlerinin  $b = 1.88$  ve farklı  $QC$  değerleri için  $d$  parametresine göre kök-yer eğrilerinin değişimi.

#### 4. Sonuç

Yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricilerinde meydana gelen Demet-Dalga etkileşiminin incelendiği bu araştırma ve irdeleme makalesinde basitleştirilmiş formda ele alınan bir yürüyen dalgalı tüp için tüpte mevcut olabilecek dalga tipi çözümlerin elde edilmesini sağlayacak dispersiyon eşitlikleri



çıkarılmıştır. Elde edilen eşitlikler Pierce normalizasyon parametrelerinin mümkün olabilecek birçok farklı durumu ele alınarak detaylı olarak incelenmiştir. İlgili dispersiyon eşitlikleri ve zaman kabulleri kullanılarak artırılmış iletim sabitlerinin davranışları çıkarılmıştır. Mümkün olabilecek her Pierce normalizasyon parametre takımı için ilgili iletim sabitlerini gösteren kök-yer eğrileri elde edilmiştir ve her eğrinin davranışı Demet-Dalga etkileşimi çerçevesinde TWT'de ortaya çıkan dalgaların genlik ve faz karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Bu makalede farklı Pierce normalizasyon parametre takımları ele alınarak Demet-Dalga etkileşimi detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan bu inceleme ile TWT alt çalışma düzenlerinin tasarımına önemli katkılar sağlanması öngörülmektedir.

Bu çalışmada, artırılmış iletim sabitinin Pierce normalizasyon parametrelerine göre değişimlerinin kompleks  $\delta$  düzleminde bulunması gerçekleştirilmiş olmakla birlikte elde edilen kompleks  $\delta$  değerleri TWT'nin isterlerini oluşturan kazanç, gürültü faktörü, güç verimliliği gibi parametrelerin analizleri için etkin bir şekilde kullanılabilir. Aynı zamanda bu çalışmada gerçekleştirilen üçüncü derece TWT dispersiyon denklem çözümü yerine benzer adımları takip ederek dördüncü derece denklem çözümü gerçekleştirilmesi durumunda TWT'lerde karşılaşılan geri dalga etkileşimi de modellenilebilir.

TWT'de aksenal yönde Demet-Dalga etkileşiminde elektron demetinin hızı sürekli değişkenlik gösterebilmektedir. Bu değişimin çalışma isterlerine uygun yavaş dalga düzeninin seçimi ile istenilen frekans aralıklarında kontrol edilebilmesi çıkış kazancının istenilen seviyede alınması açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple, Demet Dalga etkileşimi sadece TWT'de elde edilen dalgaların davranışları noktasında değil uygun kazanç bölgesini sağlayabilecek Pierce normalizasyon parametrelerine karşılık gelebilecek tasarım parametrelerinin seçimi olacak şekilde de analiz edilebileceği öngörülmektedir.

### Conflict of Interest / Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

No conflict of interest was declared by the authors.

### Kaynaklar

Basu, B. N., (1996). Electromagnetic theory and applications in beam-wave electronics. Singapore, World Scientific.

Birdsall, C. K., Brewer, G. R. (1954). Traveling wave tube characteristics for finite values of C.

Transactions of the IRE Professional Group on Electron Devices, 1(3), 1-11.

Booske J. H., Converse M. C., (2004). Insights from one-dimensional linearized pierce theory about wideband traveling-wave tubes with high space charge, IEEE Trans. Plasma Sci., 32, 3, 1066-1072.

Brewer G., Birdsall, C., (1957). Traveling-Wave Tube Propagation Constants, IRE Transactions on Electron Devices, 4, 2, 140-144.

D'Agostino, S., Emma, F., Paoloni, C. (1998). Accurate analysis of helix slow-wave structures. IEEE Transactions on Electron Devices, 45, 7, 1605-1613.

Ertay, A. O., Şimşek, S., (2017). On the Assessment Study of Small Signal Gain Analysis of Helix Type Traveling Wave Tube with Pierce Parameters, In IV International IEEE Electromagnetic Compatibility Conference (EMC Türkiye), 1-7.

Ertay A. O., Şimşek S. (2018). Yürüyen dalgalı tüp kuvvetlendiricileri için helis yavaş dalgalı yapıların tasarımı, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı ELECO 2018 , 423-427.

Ghosh, S., Jain, P. K., Basu, B. N., (1997). Rigorous tape analysis of inhomogeneously-loaded helical slow-wave structures. IEEE Transactions on Electron Devices, 44, 7, 1158-1168.

Gilmour, A. S., (1994). Principles of Traveling Wave Tubes, Norwood, MA, USA: Artech House.

Gilmour, A. S., (2011). Klystrons traveling wave tubes, magnetrons crossed-field amplifiers and gyrotrons, 1st ed. Norwood, Mass., Artech House.

Jain, P. K., Basu, B. N., (1992). The inhomogeneous dielectric loading effects of practical helix supports on the interaction impedance of the slow-wave structure of a TWT. IEEE Transactions on Electron Devices, 39, 3, 727-733.

Jain, P. K., Basu, B. N., (1987). The inhomogeneous loading effects of practical dielectric supports for the helical slow-wave structure of a TWT. IEEE Transactions on Electron Devices, 34, 12, 2643-2648.

Kesari, V., Basu B. N., (2018). High Power Microwave Tubes Basics and Trends, San Rafael, CA, Morgan & Claypool Publishers.

Pierce, J. R., (1947). Theory of the Beam-Type Traveling-Wave Tube, Proceedings of the IRE. 35, 2, 111-123.

Pierce, J. R., (1950). Traveling-Wave Tubes, 1st ed. Princeton, N. J. Van Nostrand.

- Qiu, J. X., Levush, B., Pasour, J., Katz, A., Armstrong, C. M., Whaley, D. R., Gallagher, D. (2009). Vacuum tube amplifiers. *IEEE Microwave Magazine*, 10(7), 38-51.
- Qiu, H. J., Hu, Y. L., Hu, Q., Zhu, X. F., Li, B. (2018). Analytic Exploration of the Accuracy of Pierce's Three-Wave Beam-Wave Interaction Theory of Traveling-Wave Tubes. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46, 7, 2505-2511.
- Wong, P. Y., Chernin, D., Lau, Y. Y. (2018). Modification of Pierce's classical theory of traveling-wave tubes, *IEEE Electron Device Letters*, 39, 8, 1238-1241.