



**X Bandı Radar Antenleri için Üç Boyutlu (3D) Eklemeli
İmalat Yöntemi ile Kompozit Frekans Seçici Yüzey Kaplama
Malzemesi Üretimi**

Program Kodu: 3501

Proje No: 115E285

Proje Yürütücüsü:
Dr.Öğr.Üyesi Muhammet Hilmi NİŞANCI

NİSAN 2018
SAKARYA



ÖNSÖZ

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 3501 Kariyer Geliştirme Programı kapsamında 01/10/2015-01/04/2018 tarihleri arasında desteklenen bu projede X bandı radar antenleri için özgün üç boyutlu (3D) frekans seçici yüzey yapılarının tasarımı üretimi ve testleri gerçekleştirilmiştir.

Proje kapsamında fiber takviyeli FSY'ler ile ilgili çalışmalara ait iki tanesi Science Citation Index (SCI) olmak üzere uluslararası hakemli dergilerde üç adet makale yayınlanmış ve uluslararası bir sempozyumda iki adet bildiri sunulmuş olup polarizasyon bağımsız metal tripod takviyeli FSY tasarımları ile ilgili elde edilen bulgular için makale yazım çalışmaları devam etmektedir. Ayrıca projede yüksek lisans bursiyeri olarak görev alan Ekrem Tek ve Hacı Kadir Kayağ proje konusu ile ilgili tez çalışmalarını sürdürmektedir.

Projenin başarı ile yürütülmesi için her türlü desteği sağlayan Sakarya Üniversitesi akademik ve idari personeline ve 115E285'nolu proje kapsamında bu çalışmayı destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLO LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	2
3. GEREÇ VE YÖNTEM.....	5
3.1. Tasarım ve Benzetim için Kullanılan Gereç ve Yöntemler.....	5
3.2. Üretim için Kullanılan Gereç ve Yöntemler.....	5
3.2.1. Metal Fiber Takviyeli FSY'lerin Üretimi.....	6
3.2.2. Karbon Fiber Takviyeli FSY'lerin Üretimi	9
3.2.3. Metal Tripod Takviyeli FSY'lerin Üretimi.....	11
3.3. Ölçüm için Kullanılan Gereç ve Yöntemler	14
3.3.1. Metal Fiber Takviyeli FSY'lerin Ölçümü.....	14
3.3.2. Karbon Fiber Takviyeli FSY'lerin Ölçümü	15
3.3.3. Metal Tripod Takviyeli FSY'lerin Ölçümü.....	16
3.4. Mekanik Testler için Kullanılan Gereç ve Yöntemler	17
4. BULGULAR	18
4.1. Metal Fiber Takviyeli FSY'ler için Elde Edilen Bulgular	18
4.1.1. Metal Fiber Takviyeli Tek-Bantlı Bant Durduran FSY	18
4.1.1.1. Metal Fiber Takviye Malzemelerinin Yönelimlerinin Bant Durduran FSY'nin İletim Parametreleri Üzerindeki Etkisi	23
4.1.2. Metal Fiber Takviyeli Çok-Bantlı Bant Durduran FSY	24
4.1.3. Metal Fiber Takviyeli Tek-Bantlı Bant Geçiren FSY.....	27
4.1.3.1. Metal Fiber Takviye Malzemelerinin Yönelimlerinin Bant Geçiren FSY'nin İletim Parametreleri Üzerindeki Etkisi	33
4.1.4. Metal Fiber Takviyeli Çok-Bantlı Bant Geçiren FSY	34
4.2. Karbon Fiber Takviyeli FSY'ler için Elde Edilen Bulgular	36
4.3. Metal Tripod Takviyeli FSY'ler için Elde Edilen Bulgular	38
4.3.1. Metal Tripod Takviyeli Tek-Bantlı Bant Durduran FSY	38
4.3.1.1. Elektromanyetik Dalganın Farklı Geliş Açılarına Karşılık Metal Tripod Takviyeli FSY'nin Frekans Cevabı.....	41

4.3.2.	Metal Tripod Takviyeli Çok Bantlı Bant Durduran FSY	43
4.3.3.	Metal Tripod Takviyeli Geniş-Bantlı Bant Durduran FSY	45
4.4.	Takviye Malzemelerinin Mekanik Testleri Sonucu Elde Edilen Bulgular	47
5.	SONUÇ	53
KAYNAKLAR.....		56

TABLO LİSTESİ

Tablo 1. 9.5 GHz çalışma frekansı için metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin parametre değerleri.....	19
Tablo 2. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin parametre analizlerinde kullanılan değerler.....	20
Tablo 3. 7.63 GHz ve 10.50 GHz çalışma frekansları için metal fiber takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin parametre değerleri	25
Tablo 4. 9.68 GHz çalışma frekansı için metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre değerleri.....	28
Tablo 5. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre analizlerinde kullanılan değerler.....	30
Tablo 6. 7.18 GHz ve 9.90 GHz çalışma frekansları için metal fiber takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre değerleri.....	35
Tablo 7. 9.75 GHz çalışma frekansı için karbon fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin parametre değerleri.....	37
Tablo 8. 10 GHz çalışma frekansı için metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin parametre değerleri.....	39
Tablo 9. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin parametre analizlerinde kullanılan değerler.....	40
Tablo 10 6.48 GHz ve 8.38 GHz çalışma frekansları için metal tripod takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre değerleri.....	44
Tablo 11 10.5 GHz çalışma frekansı için metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durduran FSY'nin parametre değerleri.....	46
Tablo 12. Metal tripod takviye malzemelerinin X-ışını kırınım deseninde maksimum piklere karşılık gelen açı değerleri ile piklerin şiddetleri.....	48

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1. Metalik yapıların şekil ve geometrilerine göre FSY'lerin sınıflandırılması (a) N kutuplu veya merkeze bağlı elemanlar, (b) döngü tipi elemanlar, (c) katı iç veya plaka tipli yama elemanlar ve (d) hibrid elemanlar (Hosseini ve Hakkak, 2008; Luo vd., 2008; Ma ve Zhang, 2007; Munk, 2000; Zhang vd., 2009; Zhang, 2010).....	3
Şekil 2. Farklı FSY yapıları için eşdeğer devre modelleri (a) tekli kare döngü, (b) çiftli kare döngü, (c) üçlü kare döngü, (d) ızgaralanmış kare döngü, (e) çapraz dipol ve (f) Kudüs çapraz dipol (Dubrovka vd., 2006; Hosseini ve Hakkak, 2008; Kiani vd., 2006; Langley vd., 1982, 1983; Lee ve Langley, 1985; Luo vd., 2005, 2008; Majumdar vd., 2014; Singh vd., 2012; Sung vd., 2005; Yao vd., 2011; Zhang vd., 2009).....	4
Şekil 3. Metal fiber takviyeli FSY'lerin üretimlerinde kullanılan (a) tutucu ve (b) takviye malzemeleri.....	6
Şekil 4. Tel erozyon yöntemi ile kesilen (a) 2.4 mm çapında ve 10 mm uzunluğunda, (b) 2 mm çapında ve 7 mm uzunluğunda takviye malzemeleri, (c) takviye malzemelerinin karşılaştırması.....	7
Şekil 5. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin üretiminde kullanılan ahşap kalıp.....	7
Şekil 6. Metal fiber takviyeli (a) tek-bantlı bant geçiren (b) çok-bantlı bant geçiren ve (c) çok-bantlı bant durduran FSY'lerin üretimlerinde kullanılan plastik kalıplar.....	8
Şekil 7. Prototip üretimleri tamamlanan metal fiber takviyeli (a) tek-bantlı bant durduran, (b) çok-bantlı bant durduran, (c) tek-bantlı bant geçiren ve (d) çok-bantlı bant geçiren FSY'ler..	8
Şekil 8. Metal fiber takviyeli (a) tek-bantlı bant durduran, (b) çok-bantlı bant durduran, (c) tek-bantlı bant geçiren ve (d) çok-bantlı bant geçiren FSY'lerin prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi.....	9
Şekil 9. Prototip üretimleri tamamlanan (a) karbon fiber takviyeli (b) alüminyum fiber takviyeli FSY'ler.....	10
Şekil 10. Karbon ve alüminyum fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'lerin prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi.....	10
Şekil 11. Prototip üretimleri tamamlanan istenmeyen destek yapıları içeren ayrık ve bitişik metal tripod takviye geometrileri.....	11
Şekil 12. Destek yapıları temizlenmiş ayrık ve bitişik metal tripod takviye geometrileri.....	11
Şekil 13. Prototip üretimi tamamlanan ayrık metal tripod takviyeli FSY (a) üst görünüş, (b) perspektif görünüş.....	12
Şekil 14. Ayrık metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi.....	12

Şekil 15. Prototip üretimi tamamlanan bitişik metal tripod takviyeli FSY (a) üst görünüş, (b) perspektif görünüş.....	13
Şekil 16. Prototip üretimi tamamlanan ayırık ve bitişik metal tripod takviyeli FSY (a) üst görünüş, (b) perspektif görünüş.	13
Şekil 17. Ayırık ve bitişik metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durduran FSY'nin prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi.	14
Şekil 18. Metal fiber takviyeli FSY'lerin frekansa bağlı iletim katsayılarının ölçümünde kullanılan test düzeneğinin şematik gösterimi (a) yan görünüş, (b) perspektif görünüş.	14
Şekil 19. Metal fiber takviyeli FSY'lerin frekansa bağlı iletim katsayılarının ölçümünde kullanılan test düzeneğinin görseli (a) yan görünüş, (b) ön görünüş.....	15
Şekil 20. Test altındaki metal fiber takviyeli FSY'lerin sabitletmesinde kullanılan alüminyum tutucu aparatlar (a) ön görünüş, (b) arka görünüş.	15
Şekil 21. Karbon fiber takviyeli FSY'lerin frekansa bağlı iletim katsayılarının ölçümünde kullanılan test düzeneğinin (a) şematik gösterimi, (b) görseli.	16
Şekil 22. Test altındaki FSYlerin görselleri (a) karbon fiber takviyeli FSY, (b) ayırık metal tripod takviyeli FSY.....	17
Şekil 23. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.	18
Şekil 24. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim ve yansımaya katsayı değerleri.....	19
Şekil 25. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin eşdeğer devre modeli.	20
Şekil 26. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) takviye malzemelerinin farklı çapları (b) takviye malzemelerinin farklı uzunlukları için.....	21
Şekil 27. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay boşluklar için (b) takviye malzemeleri arasındaki düşey boşluklar için.....	22
Şekil 28. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) tutucu malzemenin farklı dielektrik değerleri için (b) tutucu malzemenin farklı kalınlıkları için.....	23
Şekil 29. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY için farklı oryantasyonlardaki takviye malzemeleri (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$, (c) $\theta = 90^\circ$ ve (d) $\theta = 135^\circ$	23
Şekil 30. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin takviye malzeme yönelimlerinin frekansa bağlı iletim katsayılarına etkisi.....	24
Şekil 31. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.	24

Şekil 32. Çok-bantlı bant durduran FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.....	25
Şekil 33. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.	26
Şekil 34. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin rezonans frekanslarındaki (a) 2D elektrik alan (b) 3D yüzey akım dağılımları.	27
Şekil 35. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.	27
Şekil 36. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.	28
Şekil 37. Sadece sürekli takviye içeren FSY ile sadece süreksiz takviye içeren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerlerinin metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren özgün FSY modeli ile karşılaştırılması.	29
Şekil 38. Süreksiz metal fiber takviye malzemelerinin merkezleri dikey boşlukların merkezleri ile (a) hizalanmamış, (b) hizalanmış tek-bantlı bant geçiren FSY'ler.....	29
Şekil 39. Süreksiz metal fiber takviye dizilimlerinin frekansa bağlı iletim parametrelerine etkisi.....	29
Şekil 40. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin eşdeğer devre modeli.....	30
Şekil 41. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) takviye malzemelerinin farklı çapları (b) takviye malzemelerinin farklı uzunlukları için.....	31
Şekil 42. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay boşluklar için (b) takviye malzemeleri arasındaki düşey boşluklar için.....	32
Şekil 43. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) tutucu malzemenin farklı dielektrik değerleri için (b) tutucu malzemenin farklı kalınlıkları için.....	32
Şekil 44. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY için farklı oryantasyonlardaki takviye malzemeleri (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$, (c) $\theta = 90^\circ$ ve (d) $\theta = 135^\circ$	33
Şekil 45. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin takviye malzeme yönelimlerinin frekansa bağlı iletim katsayılarına etkisi.	33
Şekil 46. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.	34
Şekil 47. Çok-bantlı bant geçiren FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.....	34
Şekil 48. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.	35

Şekil 49. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin rezonans frekanslarındaki (a) 2D elektrik alan (b) 3D yüzey akım dağılımları.	36
Şekil 50. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.	36
Şekil 51. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile karbon ve alüminyum fiber takviyeli FSY'lerin ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerlerinin karşılaştırması.	37
Şekil 52. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin (a) tasarım parametreleri, (b) panel boyutları.	39
Şekil 53. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.	39
Şekil 54. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) takviye malzemelerinin farklı çapları (b) takviye malzemelerinin farklı uzunlukları için.	40
Şekil 55. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) tutucu malzemenin farklı dielektrik değerleri için (b) takviye malzemeleri arasındaki uzaklıkların farklı değerleri için.	41
Şekil 56. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin farklı polarizasyonlardaki EM dalga ile uyarımı (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$ ve (c) $\theta = 90^\circ$	41
Şekil 57. Farklı polarizasyonlardaki EM dalga'nın metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayılarına etkisinin nümerik analiz sonuçları.	42
Şekil 58. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.	42
Şekil 59. Farklı polarizasyonlardaki EM dalga'nın metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayılarına etkisinin ölçüm sonuçları.	43
Şekil 60. Metal tripod takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin tasarım parametreleri.	43
Şekil 61. Metal tripod takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.	44
Şekil 62. Metal tripod takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin rezonans frekanslarındaki (a) 2D elektrik alan (b) 3D yüzey akım dağılımları.	45
Şekil 63. Metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durduran FSY'nin (a) tasarım parametreleri, (b) panel boyutları.	46
Şekil 64. Metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.	47
Şekil 65. Metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durduran FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.	47

Şekil 66. Metal tripod takviye malzemelerinin XRD ve SEM analizleri ile detaylı incelemelerinin yapılabilmesi için hazırlanan numune.....	48
Şekil 67. DMLS metodu ile üretilen metal tripod takviye malzemelerinin X-ışını kırınım deseni.	48
Şekil 68. DMLS metodu ile üretilen metal tripod takviye malzemelerinin (a) 0.5 Kx ve (b) 2.00 Kx büyütme oranlarında SEM görüntüleri.	49
Şekil 69. DMLS metodu ile üretilen metal tripod takviye malzemelerinin Back-Scatter Electron (BSE) detektörü ile 0.5 Kx büyütme oranında SEM görüntüsü.	50
Şekil 70. Basma deneyinde kullanılan ayrık metal tripod takviye numunesi.....	50
Şekil 71. Ayrık metal tripod takviye malzemesinin basma deney sonucu.....	50
Şekil 72. Çekme deneylerinde kullanılan (a) alüminyum fiber takviye, (b) karbon fiber takviye ve (c) metal tripod takviye malzeme numuneleri.....	51
Şekil 73. a) alüminyum fiber takviye, (b) karbon fiber takviye ve (c) bitişik metal tripod takviye malzemelerinin çekme deney sonuçları.....	52

ÖZET

Bu projede, X bandı radar antenleri için dairesel kesitli silindirik metal veya karbon fiber takviyeli üç boyutlu (3D) kompozit frekans seçici yüzey (FSY) kaplama malzemelerinin geliştirilmesi, karakterizasyonu ve bu malzemelerin üretimi konularında çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, normal şartlar altında dielektrik özellikleri sebebiyle elektromanyetik (EM) dalgalara geçirgen olan epoksi tutucu malzeme içine ilk olarak süreksiz metal fiber takviye malzemeleri konumlandırılarak FSY'nin çalışma frekansında bant durduran filtre karakteristiği göstermesi sağlanmıştır. Daha sonra sonlu uzunluktaki süreksiz takviye malzemeleri arasına sürekli takviyelerin ilave edilmesi ile çalışma frekansında bant geçiren filtre karakteristiğine sahip özgün FSY yapısı tasarlanmıştır. Ayrıca, farklı çap ve uzunlukta fiberler beraber kullanılarak metal fiber takviyeli FSY'ler için çok-bantlı filtre karakteristiği elde edilmiştir. Projenin ikinci aşamasında metal takviye malzemeleri yerine sağladıkları üstün mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı günümüzde kullanımları yaygınlaşan karbon takviye malzemelerinin FSY tasarımında kullanılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda hem karbon hem de metal fiber takviyeli bant durduran FSY tasarımları gerçekleştirilerek takviye malzeme türünün frekans cevabına etkileri de incelenmiştir. Ayrıca karbon takviyeli FSY'nin üretimlerinde kullanılan sertleştiricinin oranı azaltılarak eğimli radom yüzey uygulamaları için esnek ve bükülebilir kaplama malzemesi üretilmiştir. Proje kapsamında takviye malzemelerinin tutucu malzeme içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile FSY'lerin fiberler doğrultusunda yüksek mukavemet sağlamaları hedeflenmiştir. Projenin üçüncü ve son aşamasında polarizasyon bağımsız metal tripod takviyeli FSY tasarımları sunulmuştur.

Çalışmada tasarlanan tüm FSY'lerin prototip üretimleri yapılmış olup serbest uzay test metodu kullanılarak elde edilen frekansa bağlı iletim parametreleri ile bilgisayar tabanlı benzetim sonuçları doğrulanmıştır. Yapılan elektriksel çalışmalara ek olarak, üretimlerde kullanılan takviye malzemelerinin mekanik testleri de gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kompozit frekans seçici yüzeyler, üç boyutlu (3D) frekans seçici yüzeyler, fiber takviyeli yapılar, radom, bilgisayar tabanlı benzetim, iletim parametreleri

ABSTRACT

In this project, the works done in terms of the development, characterization and production of cylindrical metal or carbon fiber reinforced three-dimensional (3D) composite frequency selective surface (FSS) coating materials for X band radar antennas. In this regard, discontinuous metal fiber reinforced materials were first placed in the epoxy host material which is permeable to electromagnetic (EM) waves due to their dielectric properties under normal conditions, thereby it was provided to show the band stop filter characteristic of the FSS at the operating frequency. Then, a novel FSS with the band pass filter characteristic at the operating frequency was designed by adding the continuous reinforced materials between the finite length discontinuous materials. Additionally, multiband filter characteristic was obtained by using metal fiber reinforced material with different diameter and length. In the second phase of the project, due to the outstanding mechanical and electrical properties carbon reinforced materials which are becoming widespread today, instead of metal reinforced materials were intended to be used in FSS design. In this context, both carbon and metal fiber reinforced band stop FSS designs have been investigated and the effects of the reinforcement material type on the frequency response were also examined. Furthermore, by reducing the rate of hardeners used in the production of carbon-reinforced FSS a flexible and bendable coating material has been produced for applications of curved radome surfaces. In the scope of the project, it was aimed to provide high strength in the direction of fibers with the placement of the fibers parallel to each other. In the third and last phase of the project, polarization-independent metal tripod reinforced FSS designs were presented.

Prototype productions of all FSSs designed in the study were carried out and computer based simulation results were verified with the frequency dependent transmission parameters obtained by using free space test method. In addition to the electrical work done, mechanical tests of reinforcing materials used in production were also performed.

Keywords: Composite frequency selective surfaces, three-dimensional (3D) frequency selective surfaces, fiber reinforced structures, radome, computer based simulation, transmission parameters

1. GİRİŞ

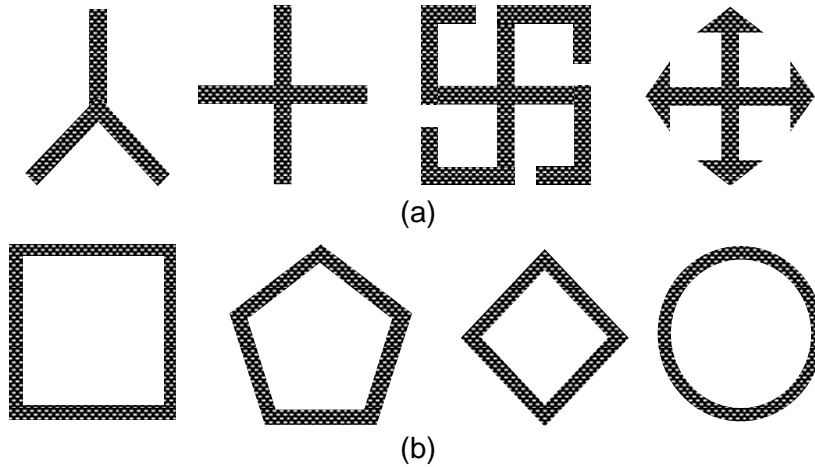
Frekans seçici yüzeylerin tasarımları ile ilgili çalışmalar günümüzde oldukça önem kazanmıştır. Yürütülen bu çalışmalar çoğunlukla dielektrik tabaka üzerine yerleştirilen periyodik iletken yamalardan ya da iletken üzerindeki periyodik açıklıklardan oluşan iki boyutlu (2D) FSY topolojilerine dayanmaktadır (Feng, 2014; Munk, 2000; Wu vd., 1995; Zhao vd., 2016). Dielektrik tabaka üzerine konumlandırılan periyodik iletken yamaların veya açıklıkların şekil ve diziliş yapılarına bağlı olarak 2D FSY'ler RF ve mikrodalga mühendisliği uygulamalarında bant durduran veya bant geçiren filtre karakteristiği gösteren kaplama malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar (Abbaspour vd., 2004; Mudar vd., 2009; Nisanci vd., 2016; Rashid vd., 2010; Sarabandi vd., 2007; Singh vd., 2012; Wu vd., 2003).

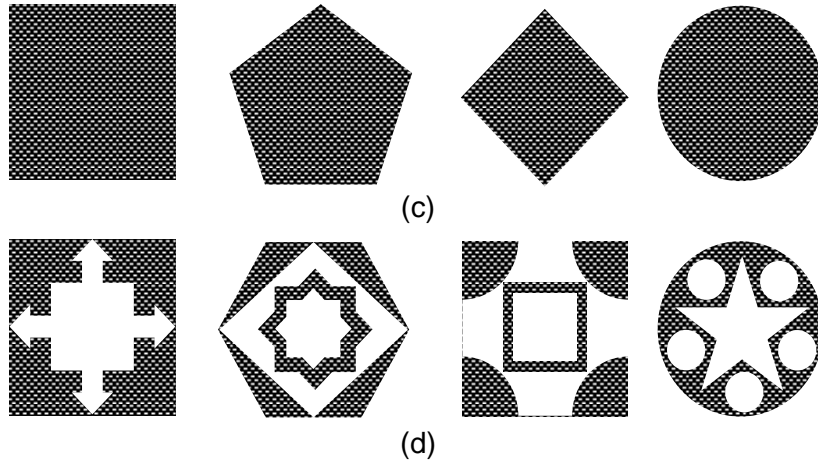
Bu proje kapsamında ilk olarak dairesel kesitli sürekli ve/veya süreksiz fiber takviyeli kompozit 3D frekans seçici yüzeylerin tasarımları üzerinde durulmuştur. Fiber takviyelerin tutucu malzeme ile desteklenmesiyle FSY'lerin elektriksel özelliklerinde önemli bir değişime sebep olmadan mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanması amaçlanmıştır. Tasarımlarda bant durduran, bant geçiren, çok-bantlı bant durduran ve çok-bantlı bant geçiren FSY'ler göz önüne alınmıştır. Ayrıca, tutucu malzeme üzerine metal tripod takviyeler konumlandırılarak polarizasyon bağımsız FSY tasarımları önerilmiştir.

Proje çalışmasında ilk olarak literatür araştırması yapılmış ve konunun geneli hakkında elde edilen detaylı bilgi Bölüm 2'de verilmiştir. Daha sonra hedeflenen FSY'lerin tasarım, üretim ve testleri için gereç ve yöntemler belirlenmiş ve Bölüm 3'te detaylandırılmıştır. Bölüm 4'te elde edilen bulgular özetlenmiştir. Son olarak Bölüm 5'te proje çalışmasına ilişkin tartışma, sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bilindiği gibi radar antenleri hedefe yüksek frekans üretici tarafından üretilen güçlü bir mikrodalga sinyali yollayıp hedefe çarpan ve geri yansıyan sinyali (dönüş sinyali) hassas bir alıcı cihaz tarafından alan sistemlerdir. Askeri ve sivil uygulamalarda kullanılan radarların anten konstrüksiyonları havanın olumsuz etkilerine karşı korumasızdır. Bu nedenle, anten tesisatını havanın olumsuz etkisinden korumak için anten konstrüksiyonları koruyucu kılıflarla kaplanmalıdır (Chen vd., 2009; Karpov vd., 2014; Singh vd., 2012). Bu koruyucu kaplama, mekaniksel olarak yüksek mukavemet, düşük termal genişleme, yüksek sönümlenme özellikleri gösterirken, elektromanyetik anlamda ise antenin çalışma frekansında bant geçiren, diğer frekanslarda bant durduran filtre özelliği taşımalıdır. Bant geçiren veya bant durduran filtre özelliğine sahip bu yapılar frekans seçici yüzeyler (FSY) olarak adlandırılırlar (Al-Joumayly ve Behdad, 2010; Bayatpur ve Sarabandi, 2008). Geleneksel olarak FSY'ler, dielektrik bir taban malzemesi (substrat) üzerine metalik yapıların bir veya iki boyutlu periyodik dizilimlerinden oluşmaktadır. FSY'lerin filtre karakteristikleri; kullanılan malzemelerin cinsine, düzlemsel dalganın geliş açısına ve polarizasyonuna, katmanlar üzerine yerleştirilen metalik yapıların şekil ve geometrileri ile periyodik yerleşimlerine ve simetri ekseninin konumuna bağlı olarak değişmektedir (Delihacioglu, 2012; Munk, 2000). Şekil 1'de gösterildiği gibi FSY'ler metalik yapıların şekil ve geometrilerine göre dört ana gruba ayrılırlar (Hosseini ve Hakkak, 2008; Luo vd., 2008; Ma ve Zhang, 2007; Munk, 2000; Zhang vd., 2009; Zhang, 2010). Birinci grup elemanları N kutuplu veya merkeze bağlı olarak bilinen üç ya da dört bacaklı dipoller ile düz, çapraz veya köşeli çapraz kutuplu elemanlardır. İkinci grup elemanları döngü tipi elemanlar olarak bilinirler. Bu kategoride en yaygın kullanılan yapılar dairesel, kare veya altıgen döngülerdir. Üçüncü grup elemanları katı iç veya plaka tipi yapılar olarak bilinen yamalıdır. Dördüncü ve son grup elemanları ise önceki grup elemanlarının birleşiminden oluşan hibrid yapılardır.

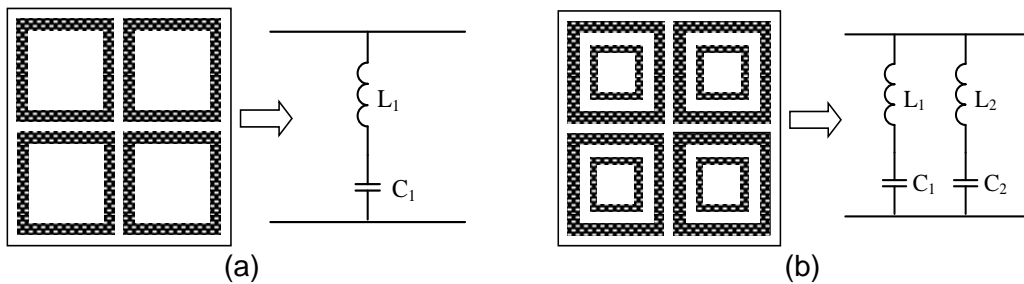


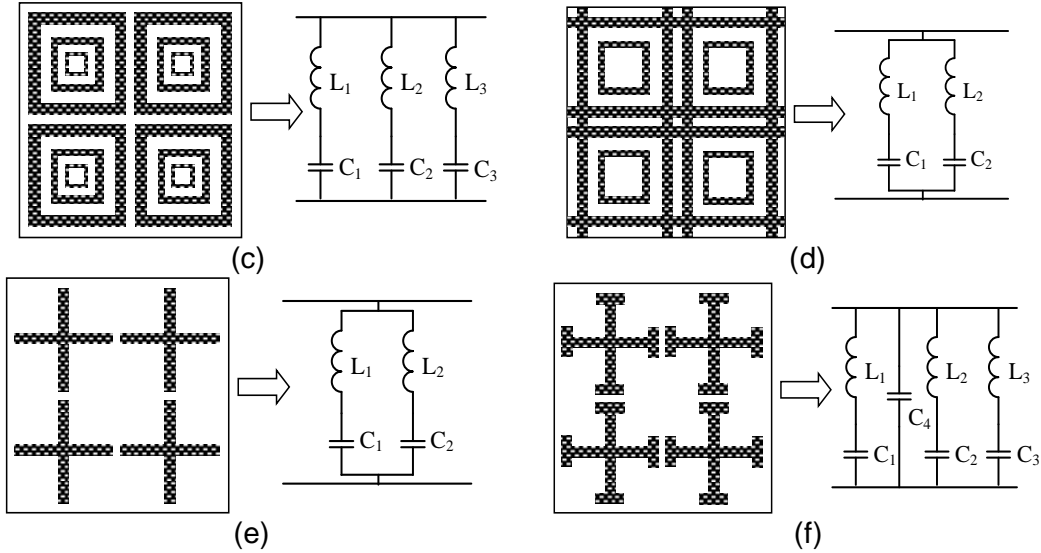


Şekil 1. Metalik yapıların şekil ve geometrilerine göre FSY'lerin sınıflandırılması (a) N kutuplu veya merkeze bağlı elemanlar, (b) döngü tipi elemanlar, (c) katı iç veya plaka tipli yama elemanlar ve (d) hibrid elemanlar (Hosseini ve Hakkak, 2008; Luo vd., 2008; Ma ve Zhang, 2007; Munk, 2000; Zhang vd., 2009; Zhang, 2010).

FSY tasarımlarında kullanılan metalik yapıların geometrik şekilleri ve boyutları endüktif (L) etki oluştururken taban malzemesinin dielektrik sabiti ve kalınlığı kapasitif (C) etki oluşturmaktadır. Dolayısı ile FSY'ler bir LC rezonans devresi ile modellenebilmekte ve tasarım aşamasında çalışma frekansları eşdeğer devre modellerinden tahmin edilebilmektedir (Dubrovka vd., 2006; Kiani vd., 2006; Kumar vd., 1998; Langley ve Parker, 1982; Lee ve Langley, 1982, 1983, 1985; Majumdar vd., 2014; Romeu vd., 1999; Singh vd., 2012; Sung vd., 2005; Yao vd., 2011). Şekil 1'de verilen farklı geometrilerde metalik elemanlara sahip FSY'ler için önerilen eşdeğer devre modellerinden bazıları Şekil 2'de görülmektedir.

Mevcut çalışmalar incelendiğinde karmaşık geometrik şekle sahip metalik yapıların eşdeğer devre modellerinin FSY'lerin çalışma frekanslarını belli bir hata ile yakınsayabildikleri tespit edilmiştir (Majumdar vd., 2014; Singh vd., 2012). Hata oranlarının azaltılıp FSY'lerin çalışma frekanslarının daha doğru tahmin edilebilmesi için farklı optimizasyon yöntemleri ile birlikte parametre taramasına olanak veren elektromanyetik simülasyon programlarının literatürde yaygın olarak kullanıldığı görülmüştür. Böylece, farklı tasarım parametrelerine karşılık FSY'lerin frekans cevapları incelenerek istenilen çalışma frekansı için parametre değerleri nümerik yöntemlerle elde edilip prototip üretimleri gerçekleştirilebilmektedir.





Şekil 2. Farklı FSY yapıları için eşdeğer devre modelleri (a) tekli kare döngü, (b) çiftli kare döngü, (c) üçlü kare döngü, (d) ızgaralanmış kare döngü, (e) çapraz dipol ve (f) Kudüs çapraz dipol (Dubrovka vd., 2006; Hosseini ve Hakkak, 2008; Kiani vd., 2006; Langley vd., 1982, 1983; Lee ve Langley, 1985; Luo vd., 2005, 2008; Majumdar vd., 2014; Singh vd., 2012; Sung vd., 2005; Yao vd., 2011; Zhang vd., 2009).

Günümüz yüksek frekans teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak FSY'ler bant durduran ya da bant geçiren filtre tasarımları başta olmak üzere, hibrid radom, yansıtıcı anten, devre analog emici ve meanderline polarizör yapılarında yaygın bir şekilde kullanım alanı bulmuştur. Kartal ve arkadaşları çalışmalarında, üç bacaklı dipol yapı içeren FSY kullanarak kosekant-kare ve fan pervanesi tipi ışınım karakteristiklerini farklı frekanslarda sağlayabilen bir reflektör anten tasarımı yapmışlardır (Kartal vd., 2011). Chen ve arkadaşları, radarlarda kullanılan antenlerin performanslarının artırılması konularında araştırmalar yürütmüş ve çift katmanlı çapraz dipol yapı içeren FSY'lerin radomların bant genişliklerini artırdığını saptamışlardır. Çalışmada ayrıca FSY'lerin kullanılan antenin radar kesit alanını (RCS) azalttığı rapor edilmiştir (Chen vd., 2009). Chen ve arkadaşlarının çalışmalarına benzer olarak Bai ve arkadaşları eğimli yüzey uygulamalarında kullanılmak üzere dairesel döngü yapı içeren bant geçiren filtre karakteristiğine sahip esnek FSY modeli önermişlerdir. Ayrıca farklı çaplarda dairesel döngü yapılarının beraber kullanılması ile önerilen FSY'nin çok-bantlı bir davranış sergilemesi amaçlanmıştır (Bai vd., 2016).

Sonuç olarak literatürdeki çalışmalar FSY'lerin elektromanyetik, anten, RF ve mikrodalga alanlarında çok çeşitli uygulama imkanlarının olduğunu ortaya koymaktadır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde proje çalışmaları için kullanılan gereç ve yöntemlerden bahsedilmiştir. Sunum bütünlüğü açısından sunulan her bir alt madde için gereçler ve yöntemler beraberce tartışılmıştır.

3.1. Tasarım ve Benzetim için Kullanılan Gereç ve Yöntemler

Basit geometrili frekans seçici yüzeylerin elektriksel performanslarının elde edilmesi için literatürde eşdeğer devre modelleri sıkça kullanılmaktadır (Dubrovka vd., 2006; Langley ve Parker, 1982, 1983; Lee ve Langley, 1985; Sung vd., 2005; Yao vd., 2011). Ancak, karmaşık geometrilere sahip FSY'ler için eşdeğer devre modellerinin hata payları arttığından dolayı günümüzde kompleks FSY tasarımlarında benzetim yöntemleri daha çok tercih edilmektedir. Bu sebeple, proje kapsamında fiber takviyeli FSY'ler ile 3D takviyeli FSY'lerin tasarım ve benzetimlerinde üç boyutlu EM problemlerin hızlı ve doğru bir biçimde çözümlenmesine olanak sağlayan yüksek performanslı tam dalga elektromanyetik çözümleyici bir yazılım olan CST Microwave Studio (MWS) kullanılmıştır (CST-Computer Simulation Technology, 2018). CST MWS bünyesinde bulundurduğu zaman bölgesi, frekans bölgesi, integral ve Eigenmode gibi çeşitli nümerik çözümleyiciler sayesinde tasarım performanslarını optimize ederek S, Y, Z gibi parazitik parametreleri çıkartabilir ve üç boyutlu yakın ve uzak elektromanyetik alanları analiz edebilir. Bu proje kapsamında FSY'lerin elektriksel performanslarının belirlenmesinde yüksek doğruluk payı ile sonuç veren zaman bölgesi çözümleyicisi kullanılmıştır. Tasarımlarda basit yapı geometrisinden dolayı fiber takviyeli FSY'lerde birim hücre modeli oluşturulurken karmaşık geometrilerinden dolayı metal tripod takviyeli FSY'lerde ise 10 x 6 takviye eleman dizisi modellenmiştir. Bu nedenle, fiber takviyeli FSY'ler için periyodik sınır koşulları seçilirken metal tripod takviyeli FSY'ler için ise açık sınır koşulları seçilmiştir. Ayrıca, gerçek deney düzeneğine uyumlu olması açısından benzetim modelleri düzlem dalga ile uyarılmış ve frekansa bağlı iletim parametre değerleri problemler ile elde edilmiştir.

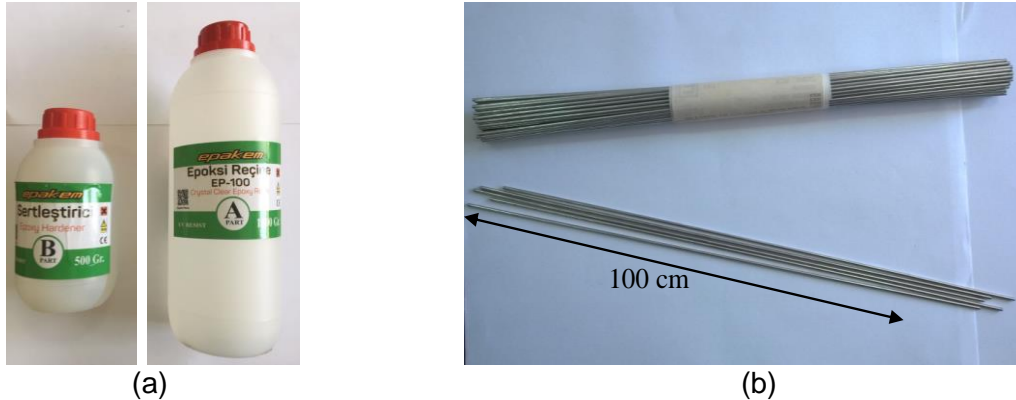
3.2. Üretim için Kullanılan Gereç ve Yöntemler

Proje kapsamında yapılan 3D FSY panel üretimleri Sakarya Üniversitesi (SAÜ) Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında elle yatırma (Hand Lay-Up) yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elle yatırmanın düşük teknoloji ve özel yetenek gerektirmediği halde, fiber takviyeli kompozit panel üretiminde çok geçerli bir yöntem olduğu bilinmektedir (Goertzen ve Kessler, 2006; Marouani vd., 2008; Uchida vd., 2015). Bu yöntemde fiber takviye malzemeleri hazırlanmış olan kalıbın içine veya tutucu malzemenin üzerine el ile ya da elle kullanılan aletler ile konumlandırıldıktan sonra üzerlerine sıvı epoksi dökülmektedir. Oda sıcaklığında 24 saat bekletilerek kurutma işlemi tamamlanan epoksinin kalıptan ayrılarak prototipleme işlemi sona ermektedir. Prototipin kalıptan ayrılmasını

kolaylaştırmak için sıvı epoksi uygulanmadan önce kalıba silikon kalıp ayırıcı püskürtülmelidir. Proje kapsamında prototipleri üretilen FSY'lerin üretim aşamaları ile üretimlerde kullanılan malzemeler alt başlıklar halinde aşağıda verilmiştir.

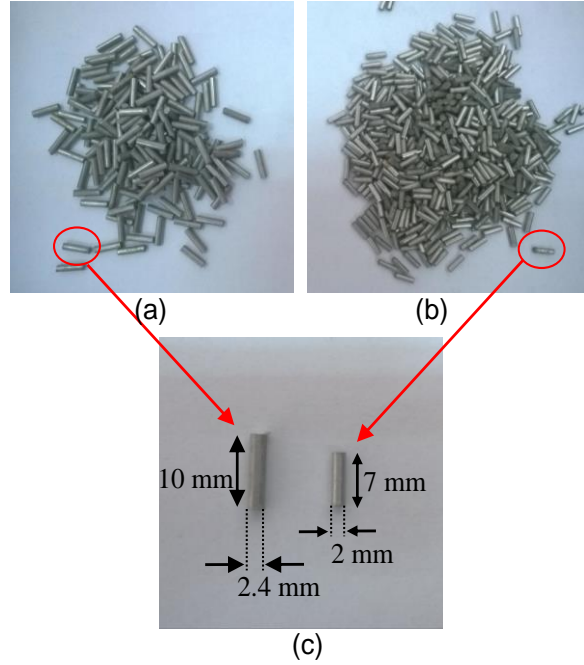
3.2.1. Metal Fiber Takviyeli FSY'lerin Üretimi

Proje kapsamında üretilen metal fiber takviyeli FSY'ler de tutucu malzeme olarak 2.9 dielektrik sabitine sahip Hobbyart EP-100 marka şeffaf epoksi, takviye malzemesi olarak ise 2.00 mm, 2.4 mm, 3.2 mm ve 4.0 mm çap seçeneklerine sahip GEKA S-6A AL 99.5 marka alüminyum teller tercih edilmiştir. Tutucu malzemenin şeffaf seçilmesinin nedeni içinde bulunan takviye malzemelerinin dizilişlerinin daha rahat görülüp takip edilebilmesi, takviye malzemesinin alüminyum seçilmesinin nedeni ise alüminyumun elektriksel iletkenliğinin (3.56×10^7 S/m) bakıra (5.8×10^7 S/m) yakın olmasına karşın alüminyumun yoğunluğunun (2.7 gr/cm³) bakırın yoğunluğundan (8.96 gr/cm³) yaklaşık olarak %48 daha az olmasıdır (Boone ve Sonderren, 2015; Coombs, 2010; Özel vd., 2008). Bu sayede prototipleri üretilecek metal fiber takviyeli FSY'lerin daha hafif olmaları hedeflenmiştir. Ayrıca, alüminyumun işlenmesinin ve montajının bakıra göre daha kolay olması üretim kolaylığı sağlamış ve maliyetleri düşürmüştür. Metal fiber takviyeli FSY'lerin prototip üretimlerinde kullanılan tutucu ve takviye malzeme numuneleri sırası ile Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'de gösterilmiştir.



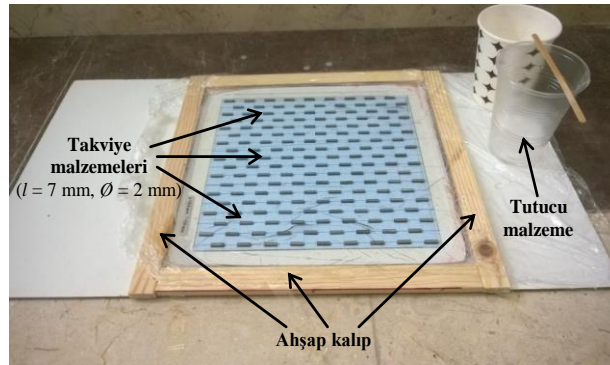
Şekil 3. Metal fiber takviyeli FSY'lerin üretimlerinde kullanılan (a) tutucu ve (b) takviye malzemeleri.

Metal fiber takviyeli FSY'lerin üretimleri için ilk olarak 2.4 mm ve 2 mm çapındaki alüminyum takviye malzemeleri Şekil 4'de gösterildiği gibi sırası ile 10 mm ve 7 mm uzunluklarda kesilmiştir. Takviye malzemelerinin yüksek hassasiyette işlenebilmeleri ve kırılma, çapaklanma ya da kopma meydana gelmemesi için elektro termal kesme (tel erozyon) yöntemi kullanılmıştır (Prohaszka vd., 1996; Rebelo vd., 2000; Rozenek vd., 2001).



Şekil 4. Tel erozyon yöntemi ile kesilen (a) 2.4 mm çapında ve 10 mm uzunluğunda, (b) 2 mm çapında ve 7 mm uzunluğunda takviye malzemeleri, (c) takviye malzemelerinin karşılaştırması.

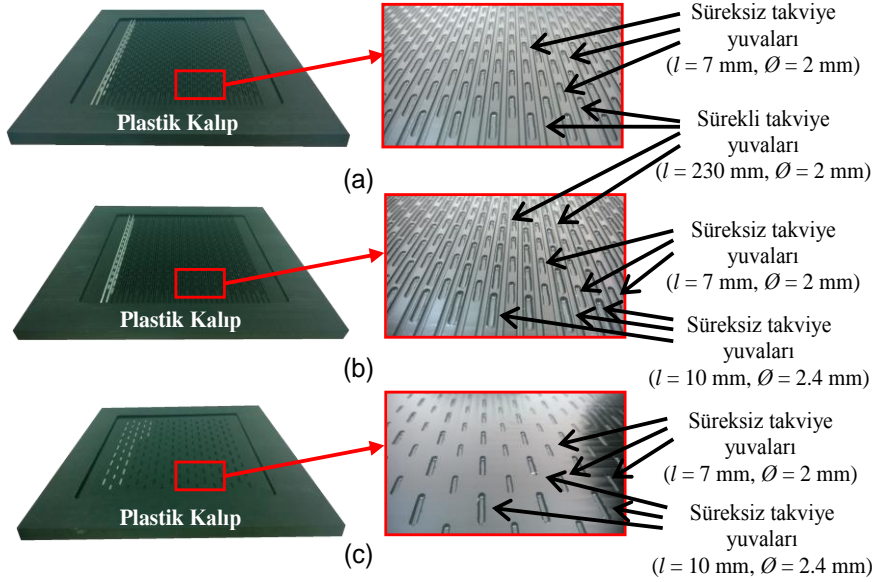
Daha sonra basit geometrisi sebebi ile tek-bantlı bant durduran FSY için ahşap kalıp hazırlanırken karmaşık geometrilerinden dolayı tek-bantlı ve çok-bantlı bant geçiren FSY'ler ile çok-bantlı bant durduran FSY için plastik kalıplar hazırlanmıştır. Plastik kalıpların hazırlanmasında yüksek hassasiyeti ve işleme hızı sayesinde daha kaliteli sonuçlara daha kısa sürede ulaşmayı sağlayan Computer Numerical Control (CNC) teknolojisi kullanılmıştır (Kumar vd., 2012; Lin ve Lee, 2001; Valera ve Bhavsar, 2014). Tek-bantlı bant durduran FSY için üretilen ahşap kalıp ile tek-bantlı ve çok-bantlı bant geçiren FSY'ler ile çok-bantlı bant durduran FSY için üretilen plastik kalıplar sırası ile Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



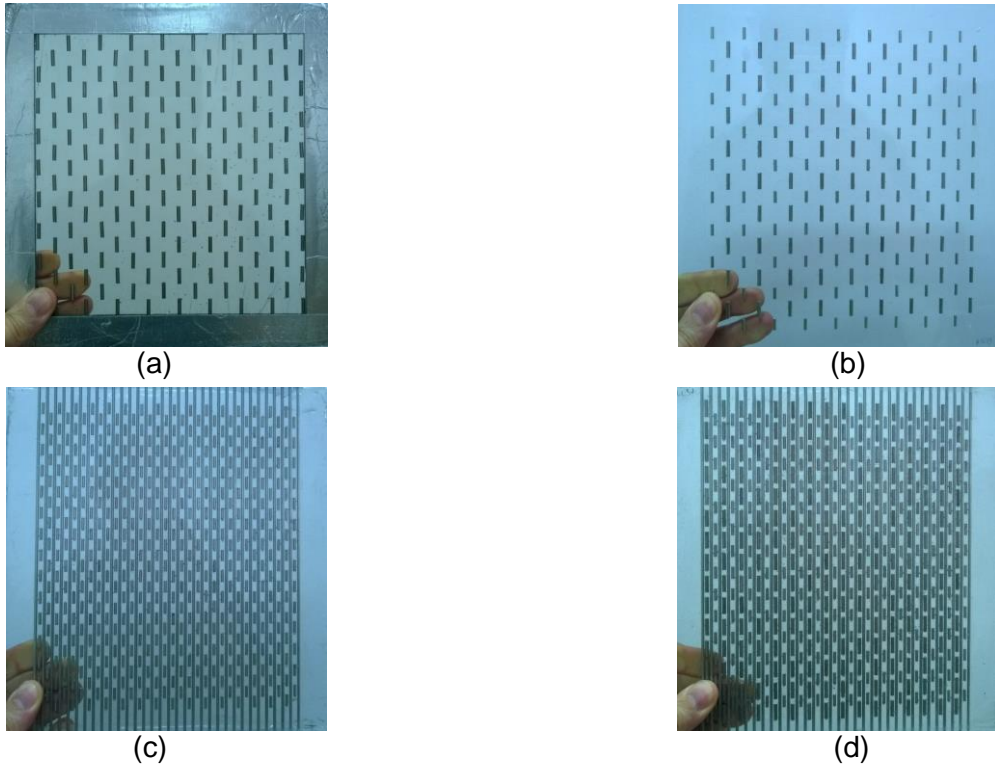
Şekil 5. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin üretiminde kullanılan ahşap kalıp.

Üretimlerde kullanılan kalıplara ilk olarak uygulanacak tutucu malzemenin kalıptan ayrılmasını kolaylaştırmak amacı ile silikon kalıp ayırıcı homojen olarak tek kat uygulanmış, daha sonra alüminyum takviye malzemeleri benzetim modeline uygun olarak kalıplar üzerine

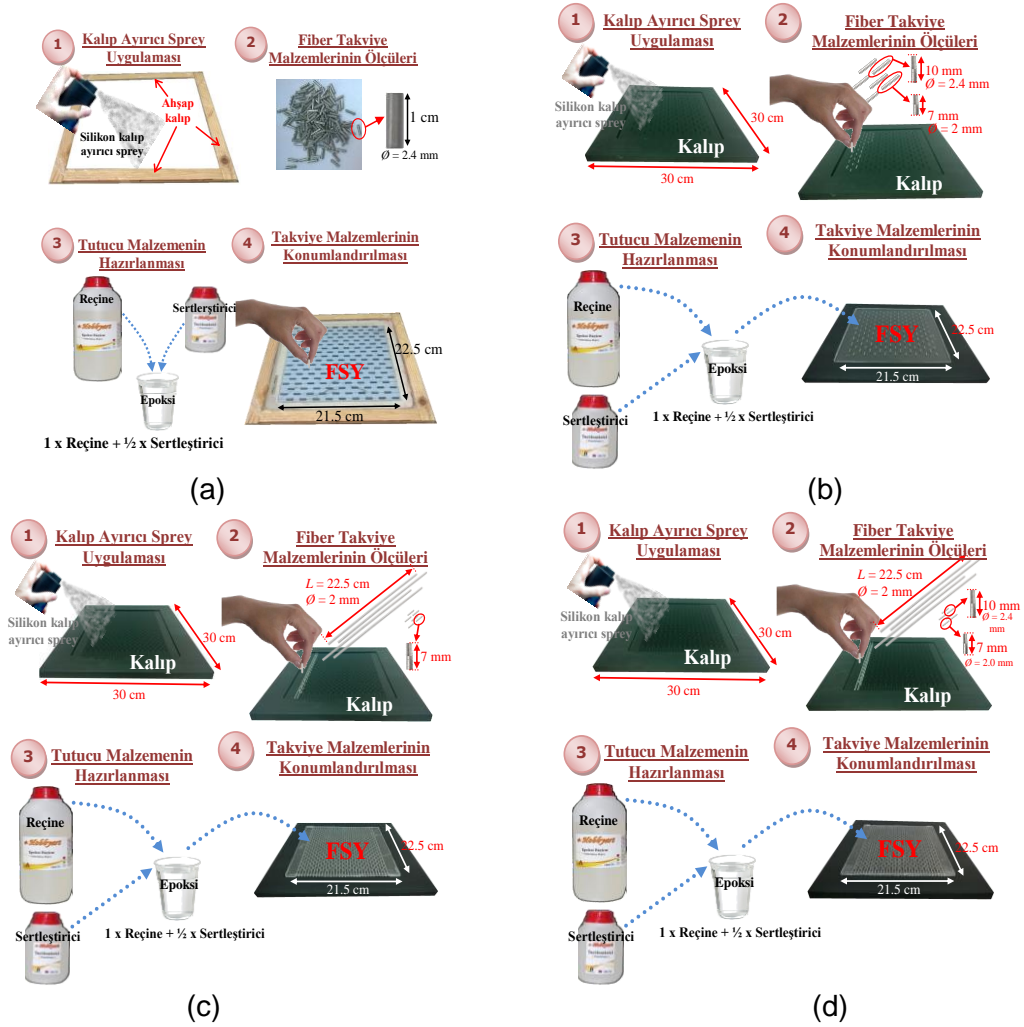
konumlandırılmıştır. Son olarak 1 ve ½ oranlarında sırası ile reçine ve sertleştirici içeren şeffaf epoksi karışımı kalıplar üzerine istenilen kalınlığa ulaşıncaya kadar ilave edilmiştir. Oda sıcaklığında 24 saat bekletilen FSY'ler kalıplardan ayrılıp takviye malzemelerinin tamamen tutucu malzeme ile kaplanması için diğer yüzeylerine de epoksi uygulanmıştır. Prototip üretimleri tamamlanan 22.5 cm x 21.5 cm boyutlarındaki FSY'ler ile prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi sırası ile Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 6. Metal fiber takviyeli (a) tek-bantlı bant geçiren (b) çok-bantlı bant geçiren ve (c) çok-bantlı bant durduran FSY'lerin üretimlerinde kullanılan plastik kalıplar.



Şekil 7. Prototip üretimleri tamamlanan metal fiber takviyeli (a) tek-bantlı bant durduran, (b) çok-bantlı bant durduran, (c) tek-bantlı bant geçiren ve (d) çok-bantlı bant geçiren FSY'ler.



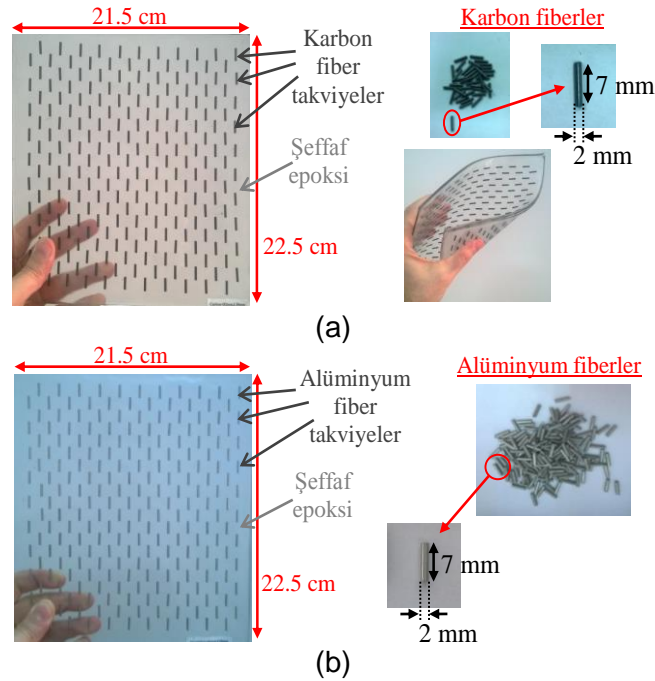
Şekil 8. Metal fiber takviyeli (a) tek-bantlı band durdurucu, (b) çok-bantlı band durdurucu, (c) tek-bantlı band geçiren ve (d) çok-bantlı band geçiren FSY'lerin prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi.

3.2.2. Karbon Fiber Takviyeli FSY'lerin Üretimi

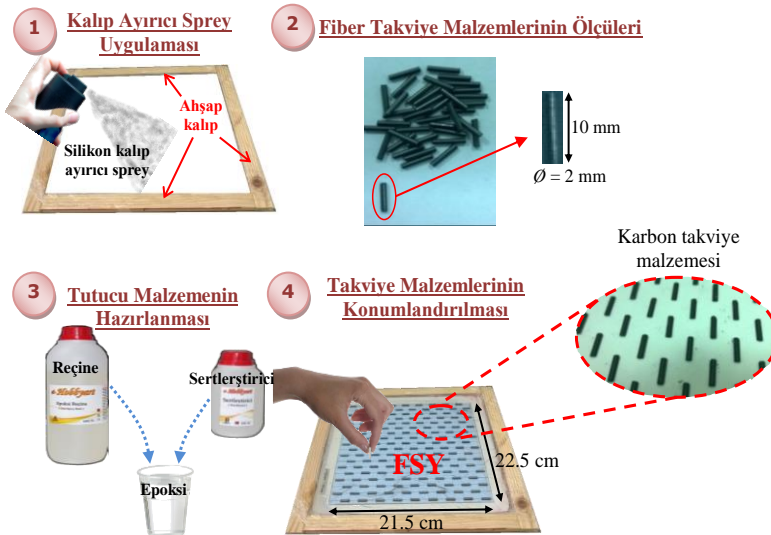
Önerilen projenin yenilikçi yönlerinden biri metal takviye malzemeleri yerine sağladıkları üstün mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı günümüzde kullanımları yaygınlaşan karbon takviye malzemelerinin FSY tasarımında kullanılmasıdır. Bu amaçla tek-bantlı band durdurucu FSY üretimi sonlu uzunlukta süreksiz karbon takviye malzemeleri ile gerçekleştirilmiştir. Karbon takviye malzemelerinin FSY'nin elektriksel performansı üzerindeki etkilerinin daha iyi incelenebilmesi için aynı tasarım parametrelerine sahip alüminyum takviyeli FSY üretimi de yapılmıştır. Üretimlerde metal takviye içeren FSY'ler için hazırlanan ahşap kalıplar kullanılmıştır. Ahşap kalıplara püskürtme yöntemi ile kalıp ayırıcı uygulandıktan sonra Şekil 9'da verilen 2 mm çapında ve 7 mm uzunluğunda ki karbon ve alüminyum takviye malzemeleri benzetim modeline uygun olarak kalıplar üzerine konumlandırılmış ve şeffaf epoksi karışımı takviye malzemelerinin üzerine dökülerek 24 saat kurumaya bırakılmıştır.

Her ne kadar proje önerisinde sunulmasa da yapılan literatür araştırmalarında esnek FSY tasarımlarına rastlanmış ve bu amaçla karbon takviyeli FSY'nin şeffaf epoksi karışımında sertleştiricinin oranının azaltılarak ($\frac{1}{2}$ yerine $\frac{1}{3}$ oranında) kompozit FSY'nin esnek olması hedeflenmiştir (Bai vd., 2016; Baskey vd., 2015).

Prototip üretimleri tamamlanan karbon ve alüminyum takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'ler ile prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi sırası ile şekil 9 ve şekil 10'da verilmiştir. şekil 9a'dan görüldüğü gibi kullanılan sertleştirici miktarının azaltılması ile esnek kompozit FSY elde edilmiştir.



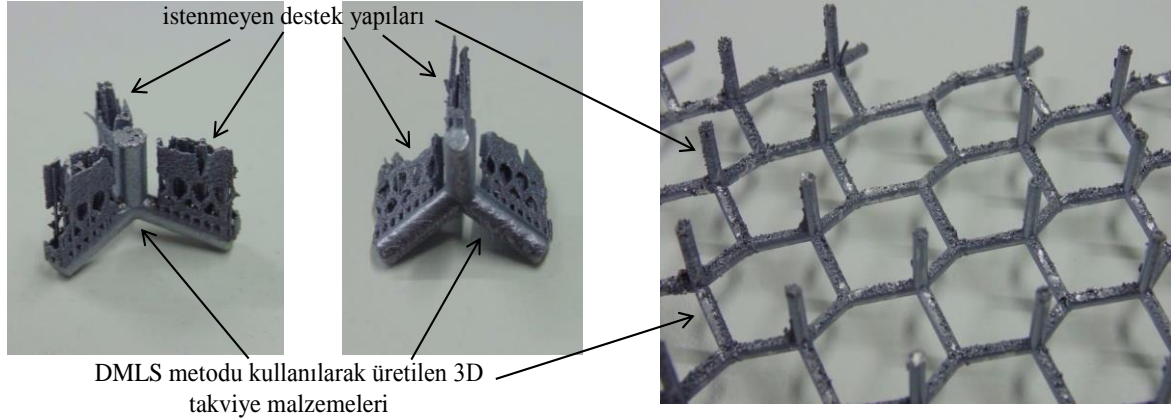
şekil 9. Prototip üretimleri tamamlanan (a) karbon fiber takviyeli (b) alüminyum fiber takviyeli FSY'ler.



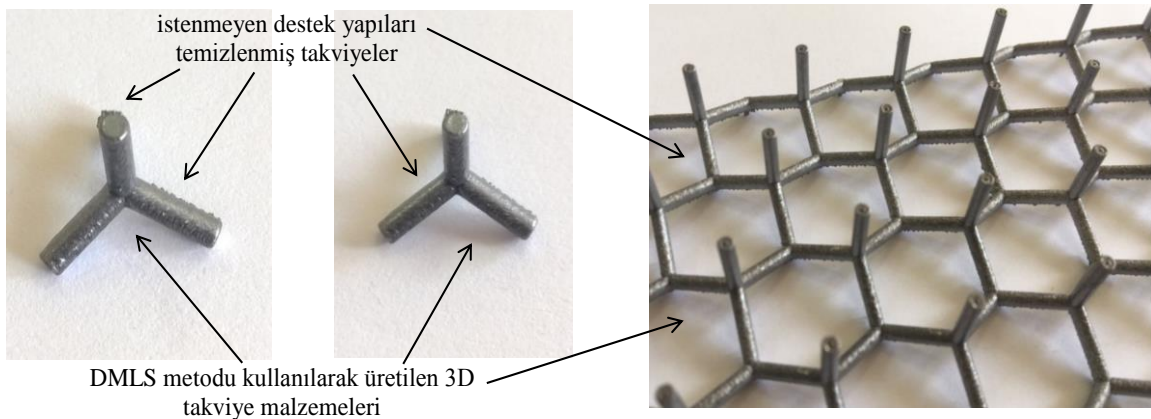
şekil 10. Karbon ve alüminyum fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'lerin prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi.

3.2.3. Metal Tripod Takviyeli FSY'lerin Üretimi

Proje kapsamında polarizasyon bağımsız yani iletim, yansıma ve soğurma özellikleri elektromanyetik dalganın geliş açısına bağlı olmayan metal tripod takviyeli frekans seçici yüzeylerin üretimlerinde eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS) metodu kullanılmıştır. Bilindiği gibi DMLS metodu katmanlar halinde serili olan metal tozlarını Computer Aided Design (CAD) verileri doğrultusunda lazer ışını ile birleştirerek parça imalatını gerçekleştiren bir yöntemdir (Bineli vd., 2011; Hanzl vd., 2015; Schnitzer vd., 2015). Tripod takviye malzemelerinin üretimlerinde hassasiyeti arttırmak için ortalama tane boyutu 30 mikron olan AlSiMg metal tozları kullanılmış ve elde edilen ilk numuneler Şekil 11'de gösterilmiştir. Üretimlerde bacak uzunluğu 7 mm olan tripod takviyeler ayrı ayrı üretilirken 10 mm bacak uzunluğuna sahip takviye malzemeleri ise 20.5 cm x 20.5 cm boyutlarında bir bütün panel şeklinde üretilmiştir. Şekil 11 incelendiğinde üretimler sonucunda geometrilerin yanında istenmeyen destek (support) yapılarının oluştuğu görülmektedir. Pürüzsüz bir yüzey elde etmek için üretimleri tamamlanan numunelerin destek yapıları fırça ile manuel olarak temizlenmiştir. Temizleme işlemi sonucu elde edilen geometriler Şekil 12'de verilmiştir.

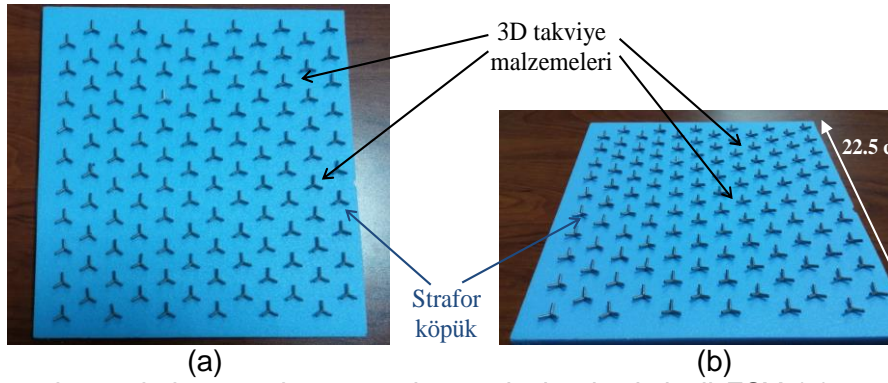


Şekil 11. Prototip üretimleri tamamlanan istenmeyen destek yapıları içeren ayrık ve bitişik metal tripod takviye geometrileri.

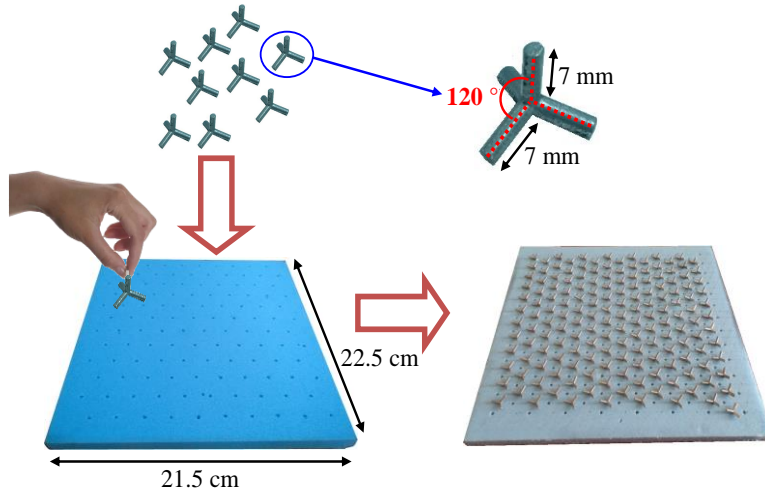


Şekil 12. Destek yapıları temizlenmiş ayrık ve bitişik metal tripod takviye geometrileri.

Metal tripod takviye malzemelerinin üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı sınırlı sayıda üretilen sinterlenmiş nihai parçalar epoksi yerine strafor köpük üzerine konumlandırılmışlardır. Bu sayede farklı FSY kombinasyonları için tripod takviyelerin tekrar tekrar kullanılmaları amaçlanmıştır. İlk olarak 10 GHz çalışma frekansında band durduran FSY üretimi için ayırık tripod takviyeler 22.5 cm x 21.5 cm boyutlarındaki strafor köpük üzerine benzetim ortamındaki tasarımlara uygun olarak yerleştirilmiştir. Prototip üretimleri tamamlanan 7 mm bacak uzunluğuna sahip metal tripod takviyeli tek-bantlı band durduran FSY ile prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi sırası ile Şekil 13 ve Şekil 14'de verilmiştir.

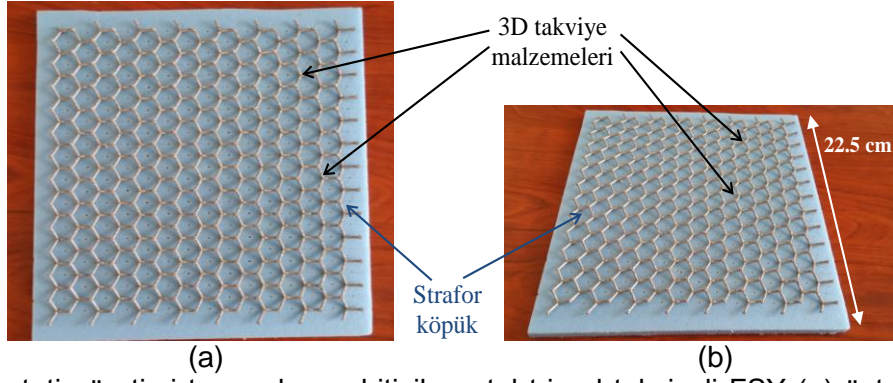


Şekil 13. Prototip üretimi tamamlanan ayırık metal tripod takviyeli FSY (a) üst görünüş, (b) perspektif görünüş.



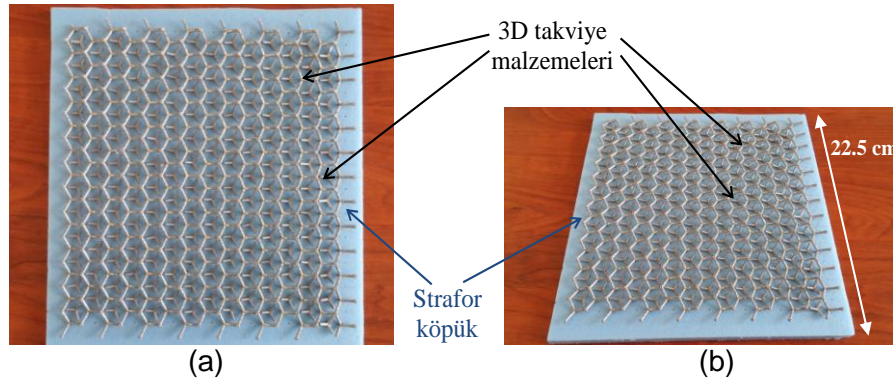
Şekil 14. Ayırık metal tripod takviyeli tek-bantlı band durduran FSY'nin prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi.

Daha sonra 20.5 cm x 20.5 cm boyutlarında bir bütün olarak üretilen 10 mm bacak uzunluğuna sahip takviye malzemeleri içeren panelin frekansa bağlı iletim performansının incelenmesi için bitişik metal tripod takviye Şekil 15'te gösterildiği gibi 22.5 cm x 21.5 cm boyutlarındaki strafor köpük üzerine yerleştirilmiştir.

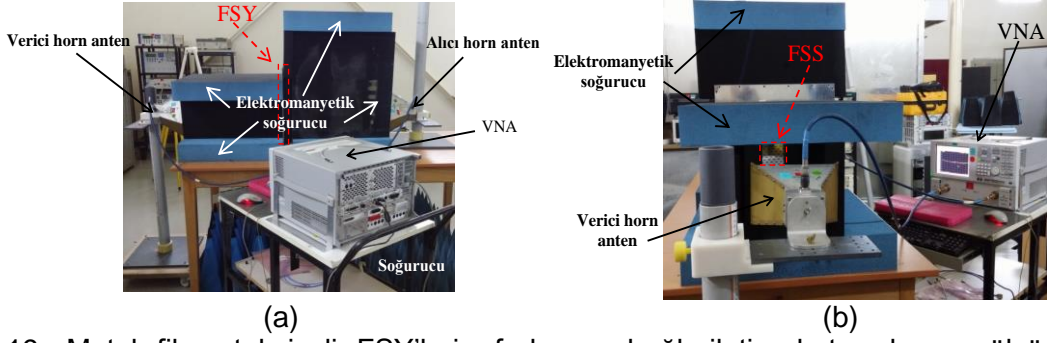


Şekil 15. Prototip üretimi tamamlanan bitişik metal tripod takviyeli FSY (a) üst görünüş, (b) perspektif görünüş.

Proje kapsamında ayrıca metal tripod takviyeli FSY'nin bant genişliğinin artırılması için ilave tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımlarda Şekil 15'de verilen bitişik metal tripod takviyeli FSY'nin üzerine ayırık metal tripod takviye malzemesi periyodik olarak konumlandırılmışlardır. Konumlandırmada 7 mm bacak uzunluğuna sahip ayırık metal tripod takviyelerin 10 mm bacak uzunluğuna sahip bitişik metal tripod takviyelere temas edip kısa devre yapmaması için özen gösterilmiştir. Prototip üretimleri tamamlanan ayırık ve bitişik metal tripod takviyeli FSY ile prototip üretim aşamalarının şematik gösterimi sırası ile Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmiştir.

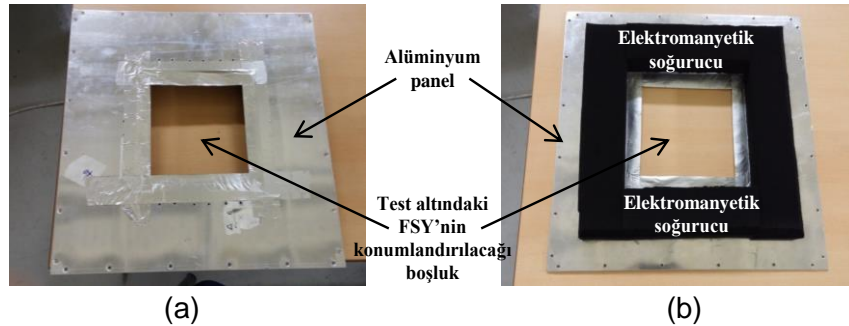


Şekil 16. Prototip üretimi tamamlanan ayırık ve bitişik metal tripod takviyeli FSY (a) üst görünüş, (b) perspektif görünüş.



Şekil 19. Metal fiber takviyeli FSY'lerin frekansa bağlı iletim katsayılarının ölçümünde kullanılan test düzeneğinin görseli (a) yan görünüş, (b) ön görünüş.

Şekil 19'dan görülen test düzeneği Hewlett Packard 11966E marka alıcı ve verici horn antenler ile 10 MHz - 20 GHz frekans bandında saçılma parametre ölçümleri yapabilen Agilent Technologies E8362B VNA'dan oluşmaktadır. Ölçümlerde gerek horn antenlerin yayılımından kaynaklanan yan lobların gerekse ortamdaki istenmeyen elektromanyetik girişim ve sinyallerin emilimini sağlayarak daha hassas ve tekrarlanabilir testler yapılması için poliüretan köpük bazlı düzlemsel elektromanyetik soğurucu malzemeler kullanılmıştır. Test düzeneğinde FSY'ler uzak alan bölgesi göz önüne alınarak antenlerden 60 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Ayrıca test altındaki FSY'lerin gelen elektromanyetik dalgaya tam dik olarak konumlandırılması için Şekil 20'de gösterilen alüminyum tutucu aparatlar kullanılmıştır. Ölçümlere başlamadan önce tutucu aparatlar boş bırakılarak (içinde FSY yokken) VNA'nın kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra ölçüm düzeneğinin doğruluğunu kontrol etmek için tutucu aparatların içine FSY'ler ile aynı boyutlara sahip bakır plaka yerleştirilerek verici anten tarafından gönderilen EM dalganın alıcı antene ulaşip ulaşmadığı test edilmiştir. Ölçüm düzeneğinin doğruluğu kanıtlandıktan sonra metal fiber takviyeli FSY'lerin ölçümlerine başlanmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları 2 GHz–16 GHz frekans aralığında 10 MHz adımlarla dB olarak kayıt altına alınmıştır.

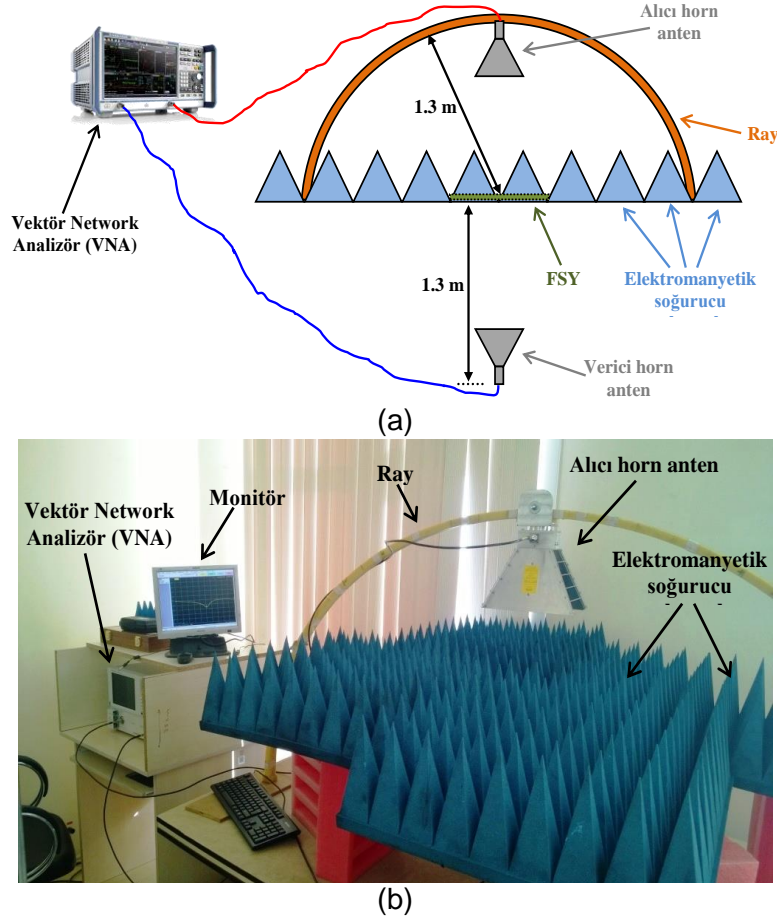


Şekil 20. Test altındaki metal fiber takviyeli FSY'lerin sabitlenmesinde kullanılan alüminyum tutucu aparatlar (a) ön görünüş, (b) arka görünüş.

3.3.2. Karbon Fiber Takviyeli FSY'lerin Ölçümü

Prototipleri üretilen karbon fiber takviyeli FSY'lerin frekansa bağlı iletim katsayılarının ölçümü Şekil 21'de gösterilen test düzeneğinde yapılmıştır. Ölçümlerde Agilent E8363B vektör

network analizör ve 1 GHz–18 GHz aralığında çalışan Hewlett Packard 11966E horn antenleri kullanılmıştır. Verici anten 1.3 m yarıçap uzunluğuna sahip yay şeklindeki yarım dairesel ray üzerine konumlandırılırken alıcı anten ise verici antenin 2.6 m odak uzaklığına yerleştirilmiştir.



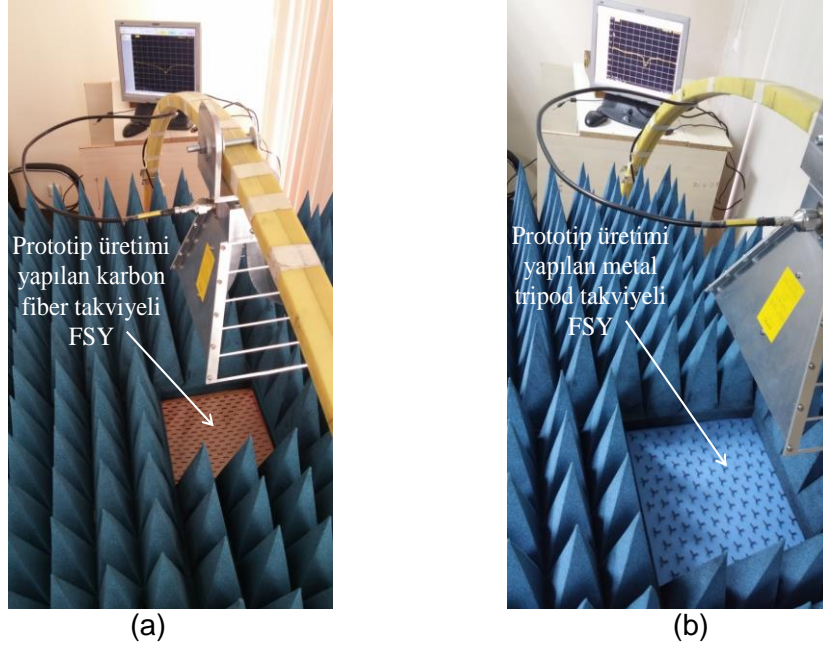
Şekil 21. Karbon fiber takviyeli FSY'lerin frekansa bağlı iletim katsayılarının ölçümünde kullanılan test düzeneğinin (a) şematik gösterimi, (b) görseli.

Şekil 21'de görüldüğü gibi, karbon fiber takviyeli FSY yerden 1.3 m yükseklikte bulunan ahşap bir düzlem üzerine alıcı ve verici antenlerin ortasına yerleştirilmiş ve istenmeyen elektromanyetik girişimleri engellemek için çevresi poliüretan köpük bazlı piramit soğurucu malzemeler ile kaplanmıştır. Antenler arası boş iken VNA kalibrasyonu yapılmış daha sonra karbon fiber takviyeli FSY'lerin frekansa bağlı iletim katsayıları 2 GHz–16 GHz frekans aralığında elde edilmiştir. Test altındaki prototipin görseli Şekil 22a'da gösterilmiştir.

3.3.3. Metal Tripod Takviyeli FSY'lerin Ölçümü

Metal tripod takviyeli FSY'lerin frekansa bağlı iletim katsayıları Şekil 21'de verilen serbest uzay ölçüm düzeneği kullanılarak 2 GHz–16 GHz frekans aralığında elde edilmiştir. Ölçümlerde doğrusal polarizasyonlu verici ve alıcı horn antenler ile 10 MHz–40 GHz bant genişliğine sahip Agilent E8363B VNA kullanılmıştır. Metal tripod takviyeli FSY'lerin

polarizasyon bağımsızlığının gösterilmesi için verici antenin döndürülmesi ile ardışıl ölçümler yapılmış ve alıcı antenden elde edilen frekansa bağlı iletim katsayıları 0° , 45° ve 90° dalga geliş açıları için karşılaştırılmıştır. Test altındaki ayırık 3D takviye malzemeleri içeren FSY'nin görseli Şekil 22b'de gösterilmiştir.



Şekil 22. Test altındaki FSYlerin görselleri (a) karbon fiber takviyeli FSY, (b) ayırık metal tripod takviyeli FSY.

3.4. Mekanik Testler için Kullanılan Gereç ve Yöntemler

Üretim aşamaları kısmında belirtildiği gibi DMLS metodunda üç boyutlu kompleks yapılar mikron boyutundaki metal tozların bilgisayar kontrolünde lazer sistemi ile bölgesel olarak eritilerek katman katman birleştirilmeleri ile üretilmektedir. DMLS metodunda lazerin gücü, tarama hızı, tarama mesafesi, katman kalınlığı, metal tozların boyutu gibi giriş parametre değerleri imal edilecek yapının mekanik özelliklerini etkilemektedir (Duman ve Kayacan, 2017; Joo vd., 2010; Kruth vd., 2005). Dolayısıyla farklı ihtiyaçlar doğrultusunda imal edilecek kompleks yapılarda istenen mekanik özellikler, giriş parametre değerlerinin değiştirilmesi ile ayarlanabilmektedir. Proje çalışmasında metal tripod takviyeli FSY'lerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için mekanik çekme, darbe ve yorulma ile SEM ve XRD analizleri Sakarya Üniversitesi Araştırma Geliştirme ve Uygulama Merkezi'nde (SARGEM) yapılmıştır. Ayrıca üretim tekniği ve malzemesi farklı olan metal ve karbon fiber takviye malzemelerine de mekanik çekme ve yorulma testleri uygulanmıştır.

4. BULGULAR

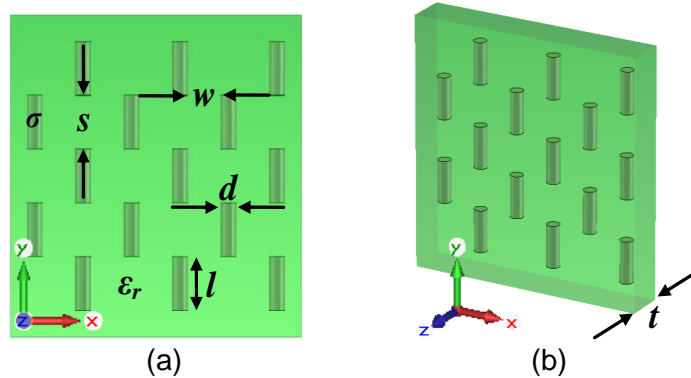
Bu bölümde, ilk olarak önerilen FSY'ler için parametre çalışmaları bilgisayar tabanlı benzetim modeli üzerinden yapılmış olup tasarım parametrelerine bağlı olarak elde edilen elektriksel performans analizleri teorik olarak açıklanmıştır. Daha sonra benzetim sonuçlarının doğrulukları ölçümler ile kanıtlanmıştır.

4.1. Metal Fiber Takviyeli FSY'ler için Elde Edilen Bulgular

Metal fiber takviyeli FSY'ler için tek-bantlı ve çok-bantlı bant durduran ve bant geçiren olmak üzere dört farklı FSY göz önüne alınmıştır. Bant durduran FSY'ler için sonlu uzunlukta takviye malzemesi içeren modeller sunulurken, bant geçiren FSY'ler için ise sürekli ve sürekli takviye malzemesi içeren özgül FSY modelleri önerilmiştir.

4.1.1. Metal Fiber Takviyeli Tek-Bantlı Bant Durduran FSY

Şekil 23'de görüldüğü gibi tek-bantlı bant durduran FSY modeli sonlu uzunlukta metal takviyelerin tutucu malzemenin içine periyodik olarak dizilimlerinden oluşmaktadır. Önerilen model takviye malzemelerinin çapı d , tutucu malzemenin kalınlığı t , sürekli takviye malzemelerinin uzunlukları l , sürekli takviye malzemelerinin arasındaki düşey ve yatay boşluklar sırası ile s ve w olmak üzere beş fiziksel, tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği ϵ_r ve takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği σ olmak üzere iki elektriksel parametreye sahiptir. Tek-bantlı bant durduran FSY'nin tasarım parametre değerleri CST MWS programının Parameter Sweep (PS) menüsü kullanılarak 9.5 GHz çalışma frekansı için Tablo 1'de listelendiği şekilde elde edilmiştir.

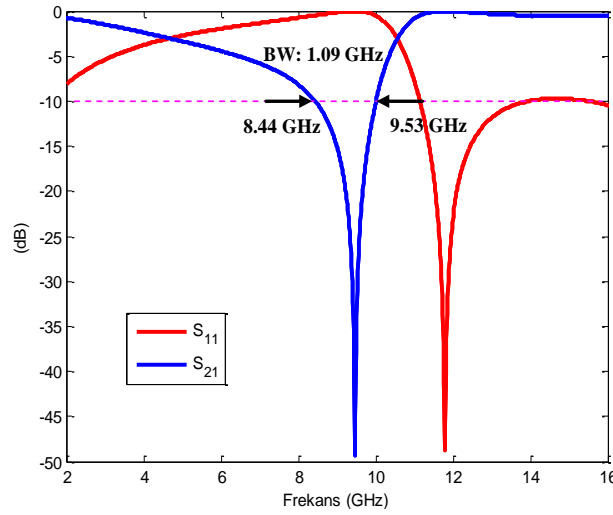


Şekil 23. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.

Tablo 1'de verilen parametre değerlerine sahip tek-bantlı bant durduran FSY'nin benzetim ortamında elde edilen frekansa bağlı iletim ve yansıma katsayıları Şekil 24'de verilmiştir.

Tablo 1. 9.5 GHz çalışma frekansı için metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin parametre değerleri.

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d	takviye malzemelerinin çapı	2.4 mm
l	süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	10 mm
s	süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki düşey boşluklar	10 mm
w	süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki yatay boşluklar	9.9 mm
t	tutucu malzemenin kalınlığı	5 mm
σ	takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	3.56×10^7 S/m
ϵ_r	tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	2.9



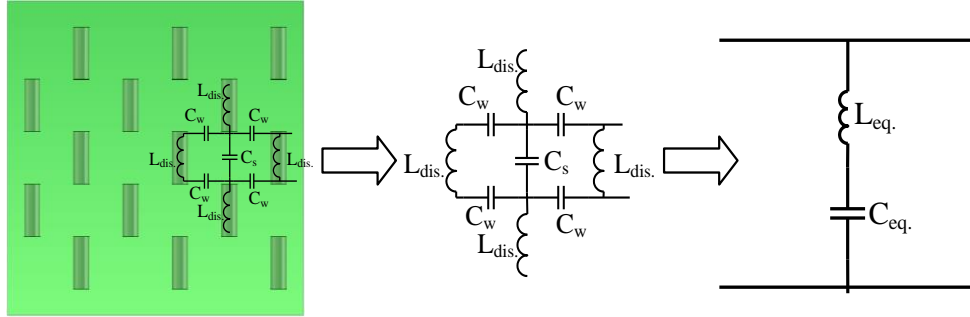
Şekil 24. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin frekansa bağlı iletim ve yansımaya katsayı değerleri.

Şekil 24'den düzlem dalga ile uyarılan FSY'nin 9.5 GHz merkez frekansında ve 1.09 GHz bant genişliğinde bant durdurucu filtre karakteristiği gösterdiği görülmektedir. Tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin frekans cevabı bilgisayar tabanlı benzetim modeli üzerinden doğrulandıktan sonra önerilen FSY'nin parametre değerlerinin çalışma frekansı üzerindeki etkileri irdelenmiştir. Bu amaçla FSY'nin tasarım parametrelerinden diğerleri sabit kalmak şartı ile sadece bir tanesinin değeri değiştirilerek nümerik analizler tekrarlanmıştır. Analizlerde kullanılan parametre değerleri Tablo 2'de listelenmiştir.

Parametre analizlerine başlamadan önce parametre değişimlerinin çalışma frekansı üzerindeki etkilerinin elektriksel olarak açıklanabilmesi için Şekil 23'de verilen tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin eşdeğer devre modeli elde edilmiştir. Şekil 25'te gösterildiği gibi süreksiz takviye malzemelerinin indüktif, takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşlukların ise kapasitif özellikli olmasından dolayı eşdeğer devre modelinde takviye malzemeleri ile boşluklar sırasıyla endüktans ve kapasitans olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin parametre analizlerinde kullanılan değerler.

d (mm)	t (mm)	l (mm)	s (mm)	w (mm)	ϵ_r
2.4	5	10	10	9.9	2.9
1.6	5	10	10	9.9	2.9
3.2	5	10	10	9.9	2.9
2.4	3	10	10	9.9	2.9
2.4	7	10	10	9.9	2.9
2.4	5	7	10	9.9	2.9
2.4	5	13	10	9.9	2.9
2.4	5	10	6	9.9	2.9
2.4	5	10	14	9.9	2.9
2.4	5	10	10	6.9	2.9
2.4	5	10	10	12.9	2.9
2.4	5	10	10	9.9	1.9
2.4	5	10	10	9.9	3.9



Şekil 25. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin eşdeğer devre modeli.

Süresiz takviye malzemeleri arasındaki yatay boşluklardan kaynaklanan kapasitansın değeri paralel tel çifti arasında oluşan kapasitans değerlerinin hesaplanmasında kullanılan Eşitlik 1 ile elde edilirken, süresiz takviye malzemeleri arasındaki düşey boşluklardan kaynaklanan kapasitansın değeri ise dairesel kesitli kapasitörün kapasitans değerinin hesaplanmasında kullanılan Eşitlik 2 ile elde edilmiştir.

$$C_w = \frac{\pi \epsilon l_{dis}}{\ln \left(\frac{d+w}{d} + \sqrt{\left(\frac{d+w}{d} \right)^2 - 1} \right)} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \pi (d/2)^2}{s} \epsilon_0 \epsilon_r (d/2) \ln \left(\frac{4\pi d}{s} - 1 \right) \quad (2)$$

Burada ϵ_0 ve ϵ_r sırası ile boş uzayın geçirgenliğini ve herhangi bir malzemenin bağlı geçirgenliğini göstermektedir.

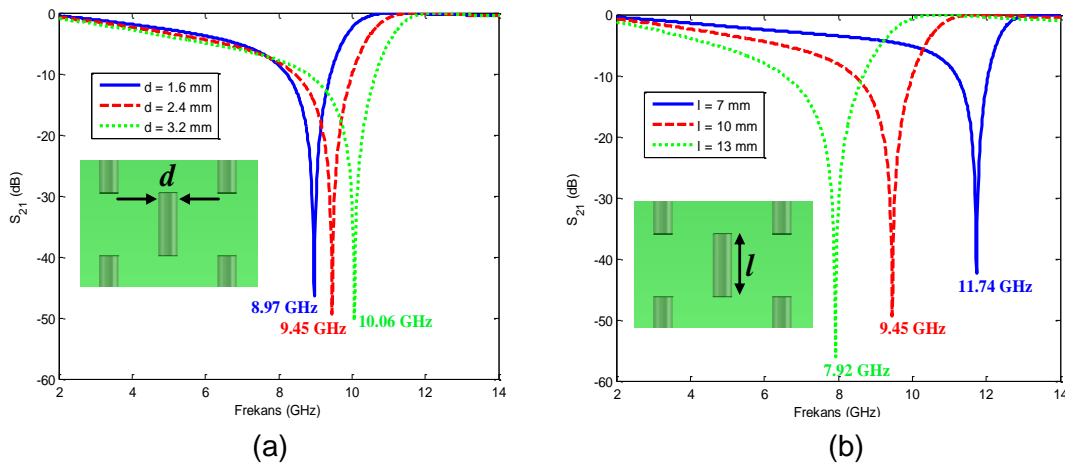
Eşdeğer devre modelinin kapasitans değerleri hesaplandıktan sonra süresiz takviye malzemelerin oluşturduğu endüktans değerleri Eşitlik 3'den elde edilmiştir.

$$L = \mu_0 l_{dis} \quad (3)$$

Son olarak, tek-bantlı bant durduran FSY'nin rezonans frekansı eşdeğer devre modeli kullanılarak Eşitlik 4'den hesaplanmıştır.

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C_{eq}}} \quad (4)$$

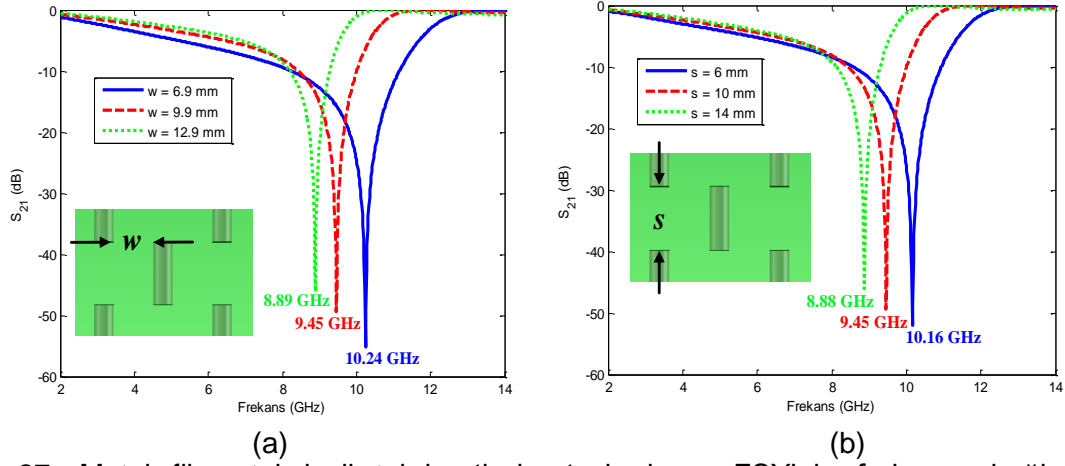
Parametre analizlerine ilk olarak takviye malzemeleri arasındaki boşluklar sabit tutularak takviye malzemelerinin çapı d 'nin değiştirilmesi ile başlanmıştır. Bunun için 2.4 mm referans çap değeri 1.6 mm ve 3.2 mm olacak şekilde modellemeler gerçekleştirilmiş ve nümerik analizler tekrarlanmıştır. Şekil 26a'dan takviye malzemelerinin çapının artması ile çalışma frekansının yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmüştür. Bunun sebebi Eşitlik 1 ve Eşitlik 4 göz önüne alınarak açıklanabilir. Eşitlik 1'den takviye malzemelerinin çaplarının artmasının süresiz takviye malzemeleri arasında oluşan kapasitans değerini azalttığı ve Eşitlik 4'den de azalan kapasitansın çalışma frekansını artırdığı görülmektedir. Tek-bantlı bant durduran FSY'nin parametre analizleri kapsamında incelenen ikinci parametre takviye malzemelerinin uzunlukları olmuştur. Şekil 26b'den 7 mm, 10 mm ve 13 mm uzunluğundaki takviyeler ile gerçekleştirilen analizlerde süresiz takviye malzemelerinin uzunlukları azaldığında FSY'nin çalışma frekansının yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmüştür. Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 irdelendiğinde FSY'nin toplam endüktans değerinin süresiz takviye malzemelerinin uzunlukları ile doğru orantılı olarak değişirken çalışma frekansı ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Sonuç olarak süresiz takviye malzemelerinin uzunluklarının artması FSY'nin toplam endüktans değerini artırırken çalışma frekansını düşürmektedir.



Şekil 26. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) takviye malzemelerinin farklı çapları (b) takviye malzemelerinin farklı uzunlukları için.

Bir sonraki analizler süresiz iletken takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşlukların frekansa bağlı iletim değerleri üzerindeki etkilenin belirlenmesi üzerine olmuştur.

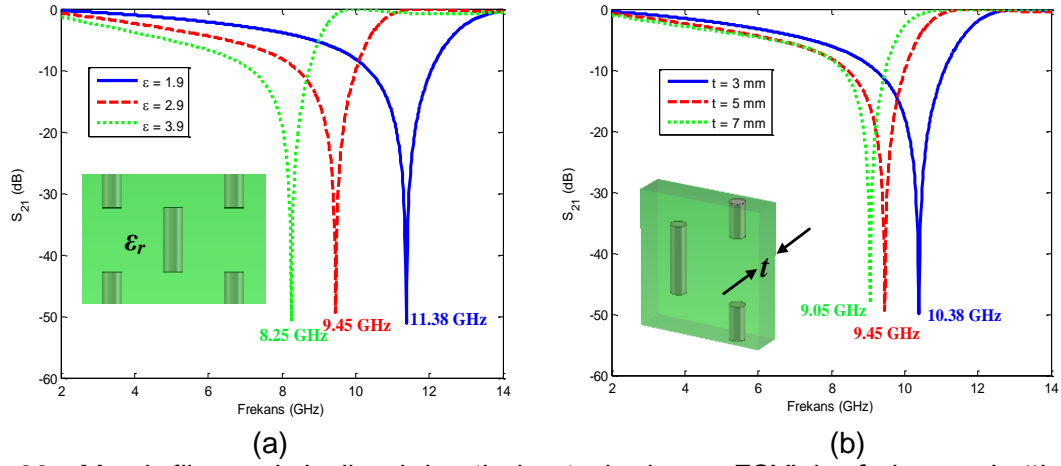
Takviye malzemeleri arasındaki yatay boşlukların 6.9 mm, 9.9 mm ve 12.9 mm ile düşey boşlukların 6 mm, 10 mm ve 14 mm değerleri için elde edilen frekansa bağlı iletim parametreleri Şekil 27’de verilmiştir. Şekil 27’den iletken takviye malzemeleri arasındaki yatay boşlukların artmasının FSY’nin toplam kapasitans değerini artırarak (Eşitlik 1) çalışma frekansını azalttığı görülürken düşey boşlukların artmasının FSY’nin toplam kapasitans değerini arttırdığı (Eşitlik 2) ve çalışma frekansını azalttığı görülmektedir.



Şekil 27. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY’nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay boşluklar için (b) takviye malzemeleri arasındaki düşey boşluklar için.

Tutucu malzemenin bağlı geçirgenliğinin FSY’nin çalışma frekansı üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak araştırılması için farklı dielektrik değerlerinde nümerik analizler yapılmıştır. Şekil 28a’da verilen karşılaştırmadan açıkça görüldüğü gibi tutucu malzemenin dielektrik sabiti 1.9, 2.9 ve 3.9 olarak değiştiğinde bant durdurucu FSY’nin çalışma frekansı sırası ile 11.38 GHz, 9.5 GHz ve 8.25 GHz olarak değişmektedir. FSY’nin çalışma frekansının düşük frekansa doğru kayması takviye malzemeleri arasında oluşan kapasitif etki göz önüne alınarak açıklanabilir. Takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşlukların oluşturduğu kapasitanslar Eşitlik 1 ve Eşitlik 2’de verildiği gibi tutucu malzemenin bağlı geçirgenliği ile doğru orantılı olarak değişirken çalışma frekansı (Eşitlik 4) ile ters orantılı olarak değişmektedir.

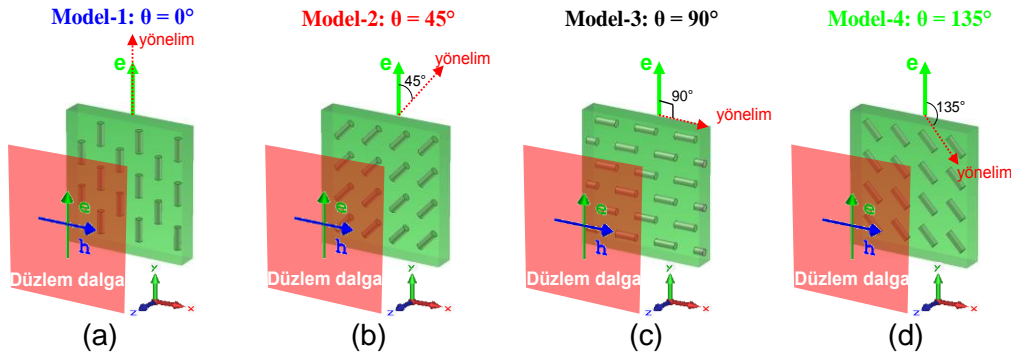
Son olarak tutucu malzeme kalınlığının FSY’nin elektriksel performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine nümerik çalışmalar yapılmıştır. Şekil 28b’den tutucu malzemenin kalınlığı arttığında FSY’nin çalışma frekansının düştüğü görülmektedir. Bu sonuç daha ince FSY tasarımlarının yapılması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 28. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) tutucu malzemenin farklı dielektrik değerleri için (b) tutucu malzemenin farklı kalınlıkları için.

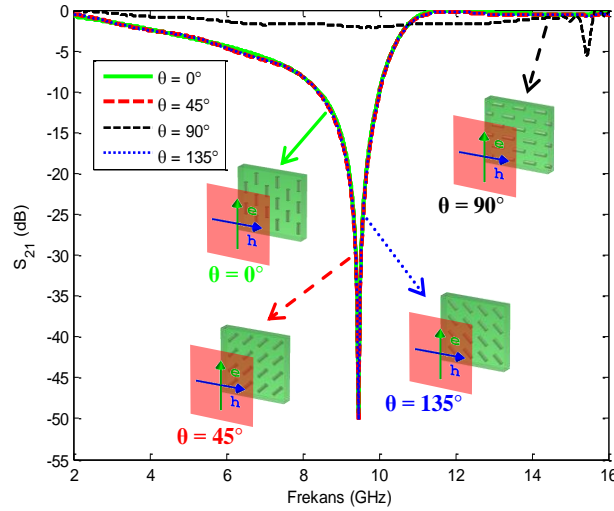
4.1.1.1. Metal Fiber Takviye Malzemelerinin Yönelimlerinin Bant Durdurucu FSY'nin İletim Parametreleri Üzerindeki Etkisi

Parametre analizinden sonra takviye malzemelerinin yönelimlerinin tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin çalışma frekansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 29'da gösterildiği gibi süresiz metal takviye malzemeleri $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$ ve $\theta = 135^\circ$ olmak üzere dört farklı açıda yönlendirilmiştir.



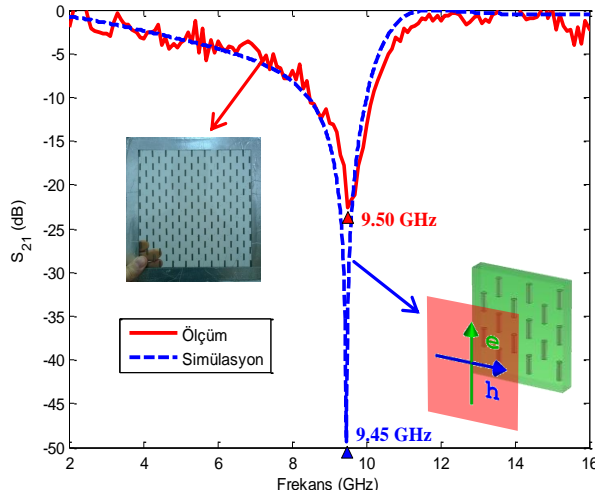
Şekil 29. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY için farklı oryantasyonlardaki takviye malzemeleri (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$, (c) $\theta = 90^\circ$ ve (d) $\theta = 135^\circ$.

Şekil 30'da verilen benzetim sonuçlarından takviye malzemelerinin $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ ve $\theta = 135^\circ$ yönelimleri için filtrenin çalışma bandında herhangi bir değişiklik olmadığı görülürken, sonlu uzunluktaki iletken fiberlerin yönelimi $\theta = 90^\circ$ olduğunda takviye malzemelerinin gelen dalganın polarizasyonuna dik olmalarından dolayı FSY'nin bant durdurucu filtre karakteristiği göstermediği görülmektedir.



Şekil 30. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin takviye malzeme yönelimlerinin frekansa bağlı iletim katsayılarına etkisi.

Bilgisayar destekli analiz aşamasından sonra benzetim sonuçlarının doğrulanması için tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin üretimine geçilmiştir. 22.5 mm x 21.5 mm x 5 mm boyutlarında prototip üretimi yapılan FSY'nin Şekil 18'de verilen ölçüm düzeneği kullanılarak elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerleri benzetim sonuçları ile Şekil 31'de karşılaştırılmıştır.



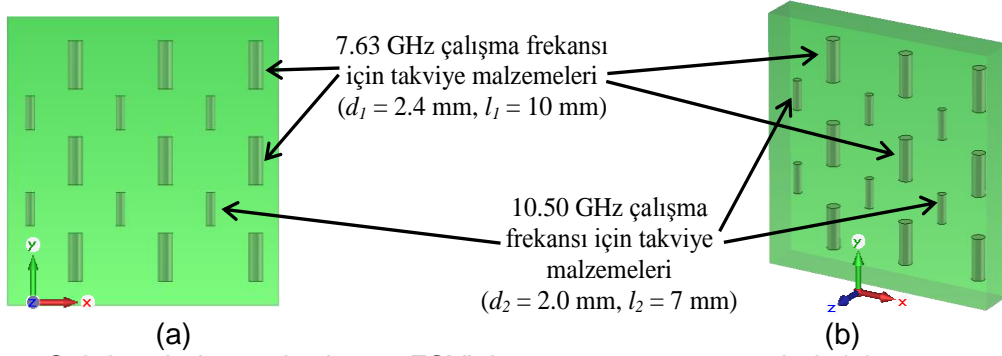
Şekil 31. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.

Görüldüğü üzere tek-bantlı bant durdurucu FSY'ye ait ölçüm ve benzetim sonuçları oldukça uyumlu bir karakteristik sergilemekle birlikte ölçüm sonuçlarında istenmeyen dalgalanmalar gözlemlenmektedir. Dalgalanmaların test düzeneğinden kaynakladığı düşünülmektedir.

4.1.2. Metal Fiber Takviyeli Çok-Bantlı Bant Durdurucu FSY

Tek-bantlı bant durdurucu FSY'lerin istenilen çalışma frekansı için modellemeleri ve analizleri yapıldıktan sonra farklı frekanslarda çalışan antenlerden oluşmuş sistemler için çok-bantlı bant durdurucu FSY tasarımları amaçlanmıştır.

Tek-bantlı bant durdurucu FSY için yapılan parametre analizlerinden takviye malzemelerinin fiziksel özelliklerinin FSY'nin çalışma frekansı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu sonuçtan yola çıkarak farklı uzunluk ve çaplara sahip takviye malzemelerinin bir arada kullanılması ile özgün çok-bantlı bant durdurucu FSY'lerin tasarlanması hedeflenmiştir. Bu kapsamda 7.63 GHz ve 10.5 GHz rezonans frekansları için Şekil 32'de verilen sonlu uzunlukta süreksiz iletken takviyeli FSY'lerin parametre değerleri CST MWS programı ile elde edilmiş ve Tablo 3'te listelenmiştir.



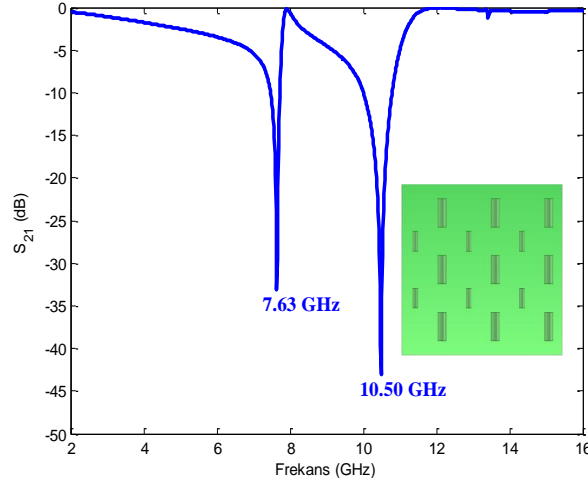
Şekil 32. Çok-bantlı bant durdurucu FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.

Tablo 3. 7.63 GHz ve 10.50 GHz çalışma frekansları için metal fiber takviyeli çok-bantlı bant durdurucu FSY'nin parametre değerleri

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d_1	7.63 GHz çalışma frekansı için takviye malzemelerinin çapı	2.4 mm
d_2	10.50 GHz çalışma frekansı için takviye malzemelerinin çapı	2.0 mm
l_1	7.63 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	10 mm
l_2	10.50 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	7 mm
s_1	7.63 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki düşey boşluklar	10 mm
s_2	10.50 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki düşey boşluklar	13 mm
w	Süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay boşluklar	7.7 mm
t	tutucu malzemenin kalınlığı	5 mm
σ	takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	3.56×10^7 S/m
ϵ_r	tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	2.9

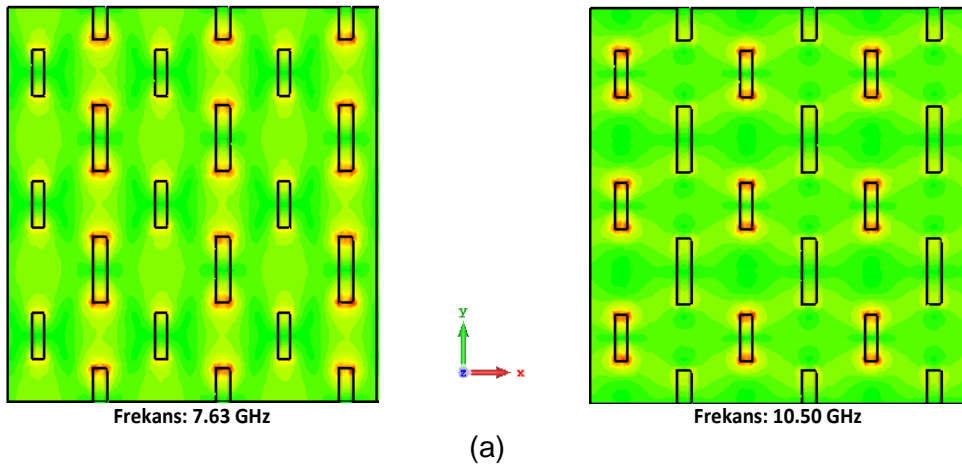
Şekil 32'de verilen modelin bilgisayar tabanlı benzetimler ile elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerleri Şekil 33'de sunulmuştur. Şekil 33'den görüldüğü gibi tasarlanan FSY

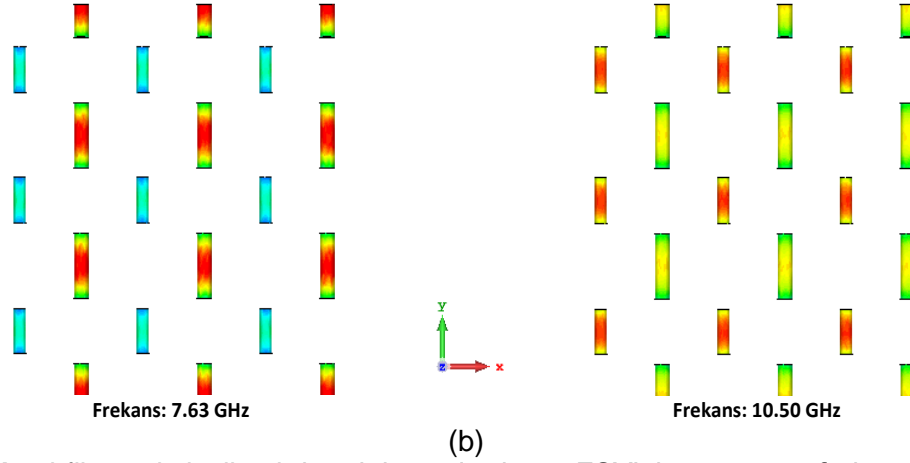
amacına uygun olarak 7.63 GHz ve 10.5 GHz frekanslarında bant durduran filtre karakteristiği gösterirken diğer frekanslarda bant geçiren filtre karakteristiği göstermektedir.



Şekil 33. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.

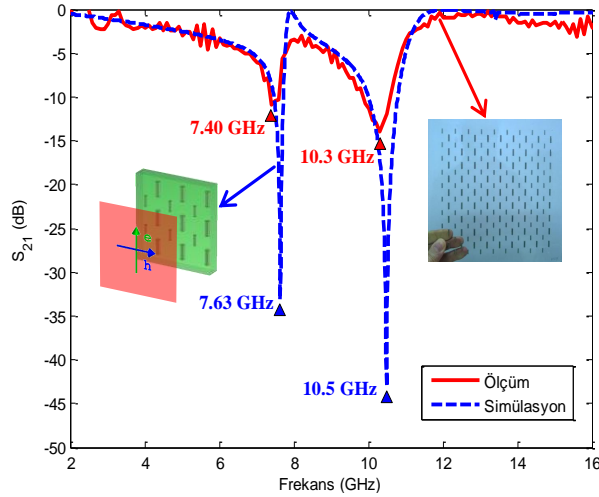
Çok-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim parametre değerlerine ilave olarak FSY'nin çalışma mekanizmasını incelemek için bilgisayar tabanlı benzetim modeli üzerinden rezonans frekanslarındaki 2D elektrik alan ile 3D yüzey akım dağılımları Şekil 34'de verilmiştir. Şekil 34'den birinci ve ikinci durdurma bantlarının sırasıyla 10 mm ve 7 mm uzunluktaki takviye malzemelerinin 7.63 ve 10.50 GHz'de rezonans oluşturmaları ile sağlandığı görülmektedir. Dalga boyu λ ile frekansın ters orantılı olarak değiştiği düşünüldüğünde elektrik alan sonuçları teorik sonuçları desteklemektedir. Ayrıca çok-bantlı bant durduran FSY'nin durdurma bantlarının farklı rezonatörlerle oluşturulması durdurma bantlarının birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır.





Şekil 34. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin rezonans frekanslarındaki (a) 2D elektrik alan (b) 3D yüzey akım dağılımları.

Çalışma frekanslarındaki elektrik alan ve yüzey akım dağılımları incelenen ve benzetimler ile parametre değerleri elde edilen çok-bantlı bant durduran FSY'nin prototip üretimi de yapılarak ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları Şekil 35'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadan sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

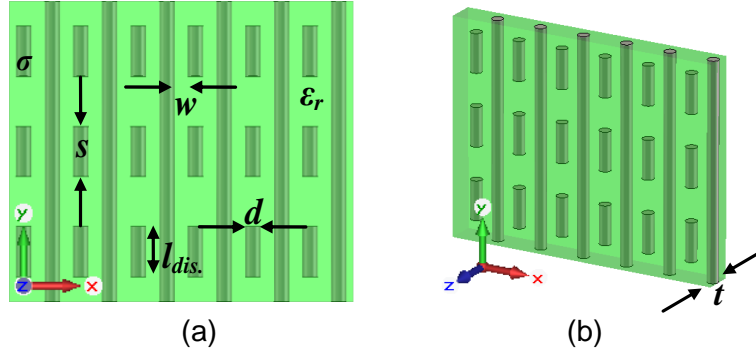


Şekil 35. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.

4.1.3. Metal Fiber Takviyeli Tek-Bantlı Bant Geçiren FSY

Proje kapsamında Şekil 36'da verilen sürekli ve süreksiz takviye malzemesi içeren tek-bantlı bant geçiren özgül FSY modeli önerilmiştir. Tek-bantlı bant geçiren FSY, takviye malzemelerinin çapı d , tutucu malzemenin kalınlığı t , süreksiz ve sürekli takviye malzemelerinin uzunlukları sırası ile l_{dis} ve l_{cont} , süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki yatay ve düşey boşluklar sırası ile w ve s olmak üzere altı fiziksel, tutucu malzemenin elektriksel geçirgenliği ϵ_r ile takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği σ olmak üzere iki

elektriksel parametreye sahiptir. Bu parametrelerin değerleri CST MWS programının PS menüsü kullanılarak 9.68 GHz çalışma frekansı için elde edilmiş ve Tablo 4'te listelenmiştir.



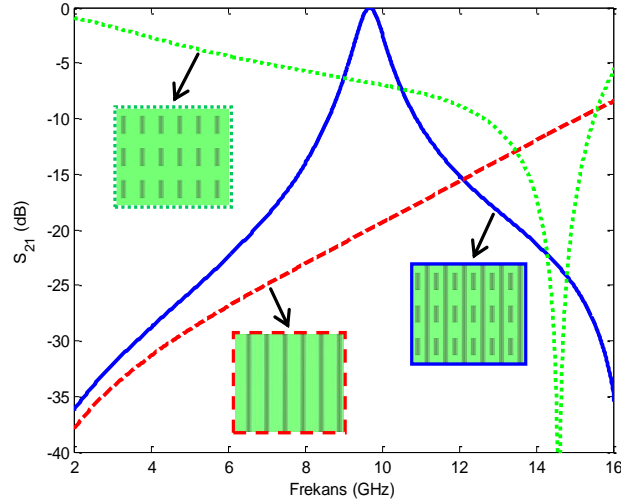
Şekil 36. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.

Tablo 4. 9.68 GHz çalışma frekansı için metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre değerleri.

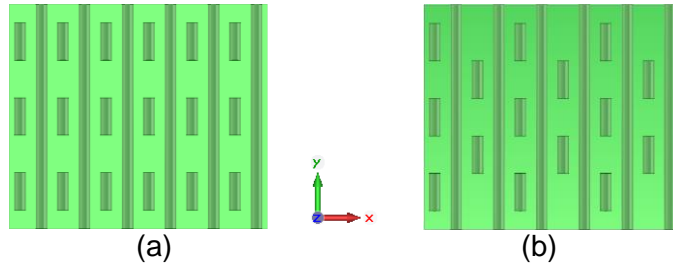
Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d	takviye malzemelerinin çapı	2 mm
l	sürekli takviye malzemelerinin uzunlukları	7 mm
s	sürekli takviye malzemelerinin arasındaki düşey boşluklar	6 mm
w	sürekli takviye malzemelerinin arasındaki yatay boşluklar	0.7 mm
t	tutucu malzemenin kalınlığı	5 mm
σ	takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	3.56×10^7 S/m
ϵ_r	tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	2.9

Sürekli ve sürekli takviye malzemelerinin frekansa bağlı iletim parametreleri üzerindeki etkilerinin araştırılması için sadece sürekli takviye içeren FSY ile sadece sürekli takviye içeren FSY'nin benzetim sonuçları tek-bantlı bant geçiren özgün FSY modeli ile Şekil 37'de karşılaştırılmıştır.

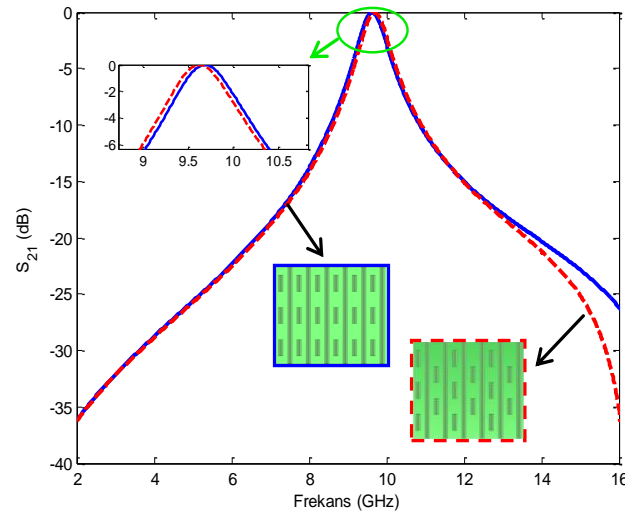
Şekil 37'den görüldüğü gibi sürekli ve sürekli takviye içeren FSY modeli bant geçiren filtre karakteristiği gösterirken sadece sürekli takviye içeren FSY ile sadece sürekli takviye içeren FSY modelleri sırası ile yüksek geçiren ve bant durduran filtre karakteristikleri göstermektedirler. Bant geçiren özgün FSY modelin filtre cevabı bilgisayar tabanlı benzetimler ile doğrulandıktan sonra yapının mekanik mukavemetini arttırmak için sürekli takviye malzemelerinin merkezleri dikey boşlukların merkezleri ile hizalanarak Şekil 38'de gösterildiği gibi homojen dağılmış sürekli takviye malzemeleri içeren bant geçiren FSY modeli geliştirilmiştir. Şekil 39'da her iki bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim parametreleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 37. Sadece sürekli takviye içeren FSY ile sadece süreksiz takviye içeren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayısı değerlerinin metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren özgün FSY modeli ile karşılaştırılması.



Şekil 38. Süreksiz metal fiber takviye malzemelerinin merkezleri dikey boşlukların merkezleri ile (a) hizalanmamış, (b) hizalanmış tek-bantlı bant geçiren FSY'ler.



Şekil 39. Süreksiz metal fiber takviye dizilimlerinin frekansa bağlı iletim parametrelerine etkisi.

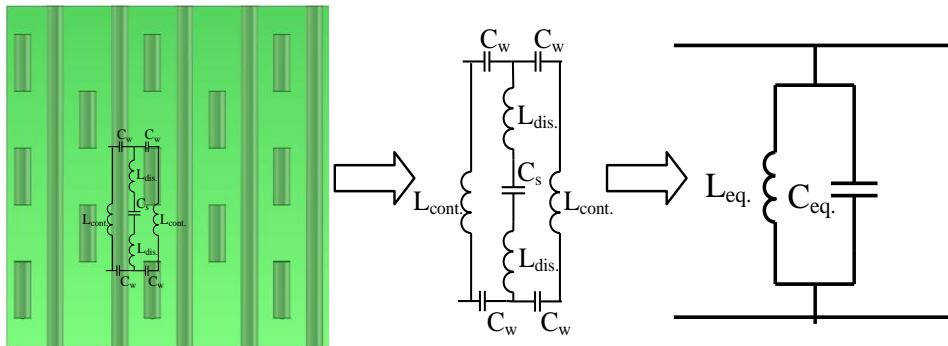
Şekil 39'dan her iki bant geçiren FSY'nin de çalışma frekanslarının aynı olduğu görüldüğünden bundan sonraki analizlerde homojen dağılmış süreksiz takviye malzemeleri içeren bant geçiren FSY modeli referans olarak seçilmiştir.

Tek-bantlı bant geçiren FSY'nin frekans cevabı bilgisayar tabanlı benzetim modeli üzerinden doğrulandıktan sonra önerilen FSY modelin parametre analizleri yapılmıştır. Bu amaçla Tablo 5'de listelenen FSY'nin tasarım parametrelerinden diğerleri sabit kalmak şartı ile sadece bir tanesinin değeri değiştirilerek nümerik analizler tekrarlanmıştır.

Tablo 5. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre analizlerinde kullanılan değerler.

d (mm)	t (mm)	ldis (mm)	s (mm)	w (mm)	Er
2	5	7	6	0.7	2.9
1.6	5	7	6	0.7	2.9
2.4	5	7	6	0.7	2.9
2	3	7	6	0.7	2.9
2	7	7	6	0.7	2.9
2	5	5	6	0.7	2.9
2	5	9	6	0.7	2.9
2	5	7	4	0.7	2.9
2	5	7	8	0.7	2.9
2	5	7	6	0.5	2.9
2	5	7	6	0.9	2.9
2	5	7	6	0.7	1.9
2	5	7	6	0.7	3.9

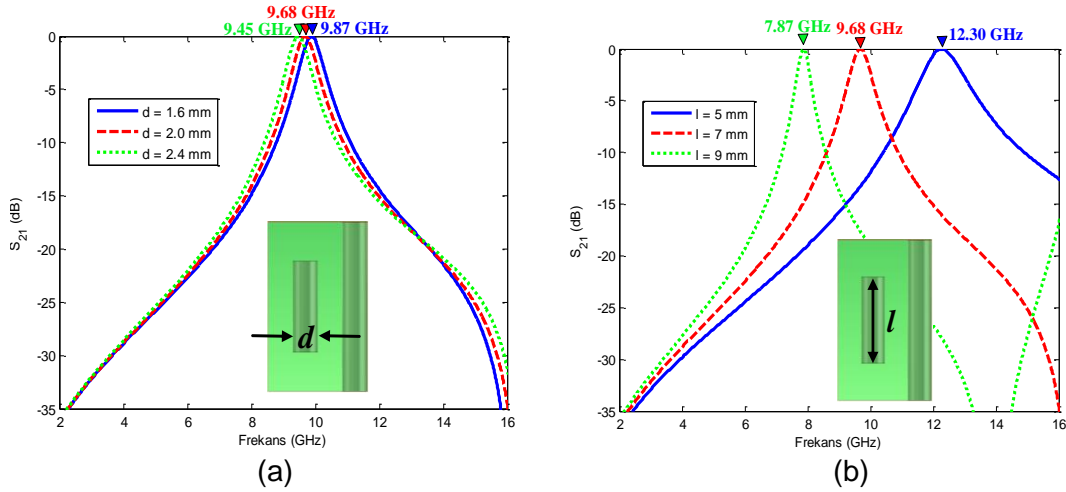
Parametre analizlerine başlamadan önce bant durduran FSY için elde edilen eşdeğer devre modeline benzer bir devre modeli Şekil 38b'de verilen tek-bantlı bant geçiren FSY için de elde edilmiştir. Şekil 40'da verilen eşdeğer devre modelinde sürekli ve süreksiz iletken takviye malzemeleri endüktans olarak tanımlanırken takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşluklar ise kapasitans olarak tanımlanmıştır.



Şekil 40. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin eşdeğer devre modeli.

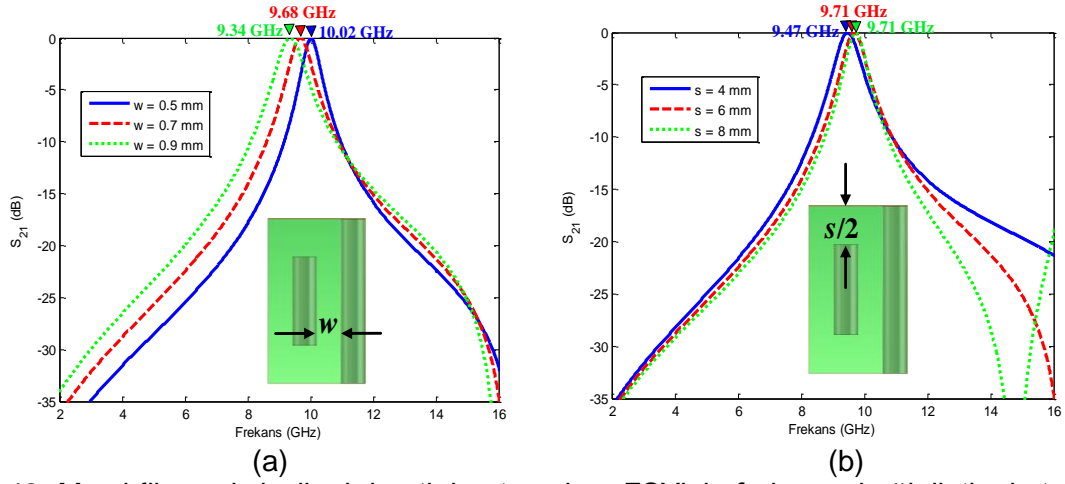
Eşdeğer devre modelinde sürekli ve süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay boşluklardan kaynaklanan kapasitans ile süreksiz takviye malzemeleri arasındaki düşey boşluklardan kaynaklanan kapasitansın değerleri sırasıyla Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'den elde edilirken sürekli ve süreksiz takviye malzemelerin oluşturduğu endüktans değerleri ise Eşitlik 3'ten hesaplanmıştır.

Parametre analizlerine ilk olarak tek-bantlı bant durdurucu FSY'de olduğu gibi takviye malzemeleri arasındaki boşluklar sabit tutularak takviye malzemelerinin çapı d 'nin değiştirilmesi ile başlanmıştır. 1.8 mm, 2.0 mm ve 2.4 mm çapındaki takviyeler ile gerçekleştirilen analizlerde sonuçlar birbirine yakın çıkmakla birlikte, takviye çapı ile çalışma frekansının zıt yönlü hareket ettiği görülmüştür. Bir sonraki analizler süreksiz takviye malzemelerinin uzunluklarının frekansa bağlı iletim değerleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi üzerine olmuştur. Takviye malzemelerinin uzunluklarının 6 mm, 10 mm ve 14 mm değerleri için elde edilen frekansa bağlı iletim parametreleri Şekil 41b'de verilmiştir. Şekil 41b'den süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları azaldığında FSY'nin çalışma frekansının yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmüştür. Eşitlik 3 ve Eşitlik 4 göz önüne alındığında FSY'nin toplam endüktans değerinin süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları ile doğru orantılı olarak değişirken çalışma frekansı ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Sonuç olarak süreksiz takviye malzemelerinin uzunluklarının artması FSY'nin toplam endüktans değerini artırırken çalışma frekansını düşürmektedir.



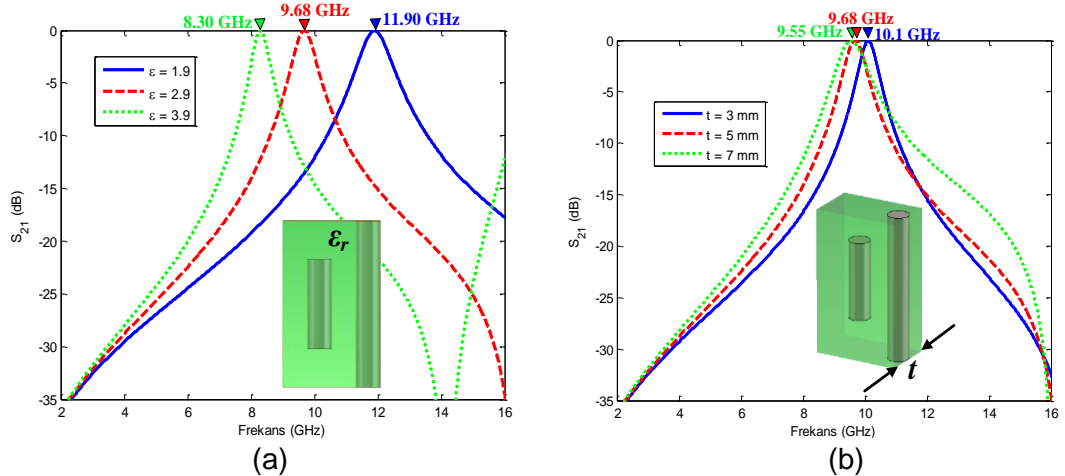
Şekil 41. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) takviye malzemelerinin farklı çapları (b) takviye malzemelerinin farklı uzunlukları için.

Tek-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre analizlerine sürekli ve süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşlukların FSY'nin çalışma frekansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi ile devam edilmiştir. Şekil 42'de verilen sonuçlardan iletken takviye malzemeleri arasındaki yatay boşlukların artmasının FSY'nin toplam kapasitans değerini artırarak çalışma frekansını azalttığı görülürken düşey boşlukların artmasının FSY'nin toplam kapasitans değerini azalttığı ve çalışma frekansını arttırdığı görülmektedir.



Şekil 42. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay boşluklar için (b) takviye malzemeleri arasındaki düşey boşluklar için.

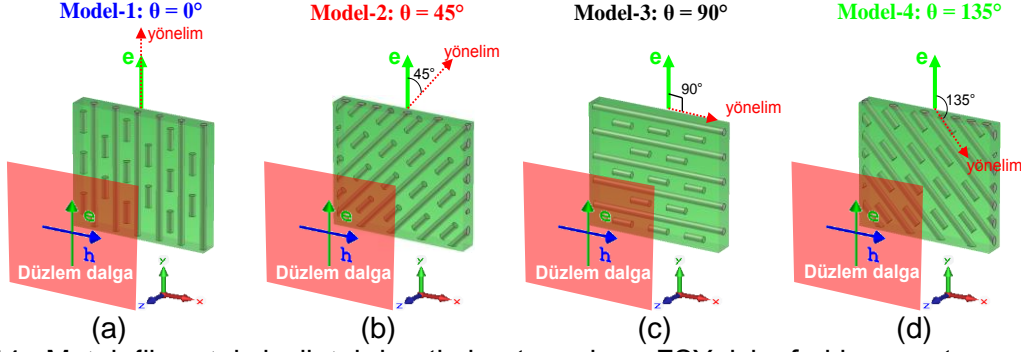
Parametre analizleri kapsamında incelenen beşinci parametre tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği olmuştur. Şekil 43a'da verilen karşılaştırmadan açıkça görüldüğü gibi tutucu malzemenin dielektrik sabiti 1.9, 2.9 ve 3.9 olarak değiştiğinde bant geçiren FSY'nin çalışma frekansı sırası ile 11.90 GHz, 9.68 GHz ve 8.30 GHz olarak değişmektedir. FSY'nin çalışma frekansının düşük frekansa doğru kayması takviye malzemeleri arasında oluşan kapasitif etki göz önüne alınarak açıklanabilir. Takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşlukların oluşturduğu kapasitanslar Eşitlik 1 ve Eşitlik 2'de verildiği gibi tutucu malzemenin dielektrik sabiti ile doğru orantılı olarak değişirken çalışma frekansının (Eşitlik 4) düşmesine sebep olmaktadır. Son olarak tutucu malzeme kalınlığının FSY'nin elektriksel performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine nümerik çalışmalar yapılmıştır. Şekil 43b'den tutucu malzemenin kalınlığı arttığında FSY'nin çalışma frekansının düştüğü görülmektedir. Bu sonuç daha ince FSY tasarımlarının yapılması açısından oldukça önemlidir.



Şekil 43. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) tutucu malzemenin farklı dielektrik değerleri için (b) tutucu malzemenin farklı kalınlıkları için.

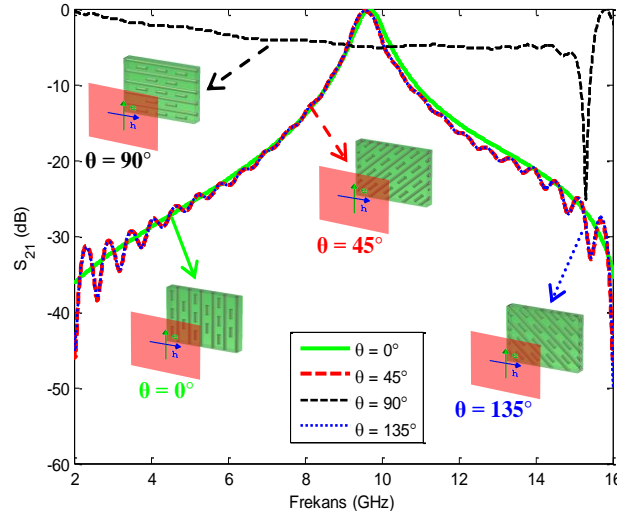
4.1.3.1. Metal Fiber Takviye Malzemelerinin Yönelimlerinin Bant Geçiren FSY'nin İletim Parametreleri Üzerindeki Etkisi

Sürekli ve süreksiz takviye malzemelerinin yönelimlerinin tek-bantlı bant geçiren FSY'nin çalışma frekansı üzerindeki etkisinin irdelenmesi için takviye malzemeleri $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 90^\circ$ ve $\theta = 135^\circ$ olmak üzere dört farklı açıda yönlendirilmişlerdir.



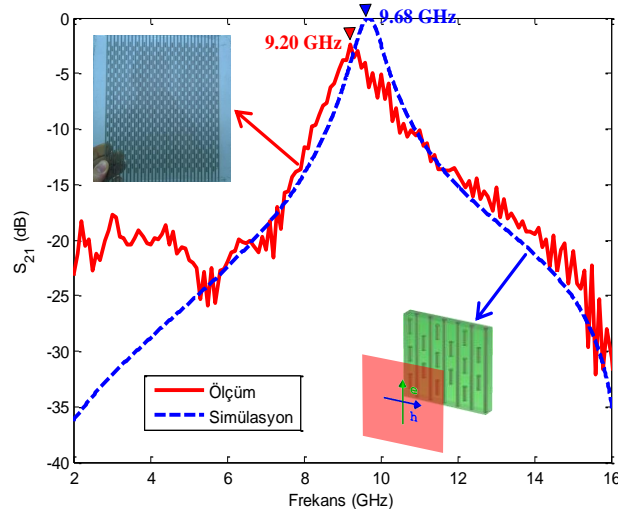
Şekil 44. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY için farklı oryantasyonlardaki takviye malzemeleri (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$, (c) $\theta = 90^\circ$ ve (d) $\theta = 135^\circ$.

Şekil 45'de verilen benzetim sonuçlarından takviye malzemelerinin $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ ve $\theta = 135^\circ$ yönelimleri için FSY'nin bant geçiren filtre karakteristiği gösterirken fiberlerin $\theta = 90^\circ$ yönelimlerinde gelen dalganın polarizasyonunun takviye malzemelerine dik olmasından dolayı FSY'nin bant geçiren filtre karakteristiği göstermediği görülmektedir.



Şekil 45. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin takviye malzeme yönelimlerinin frekansa bağlı iletim katsayılarına etkisi.

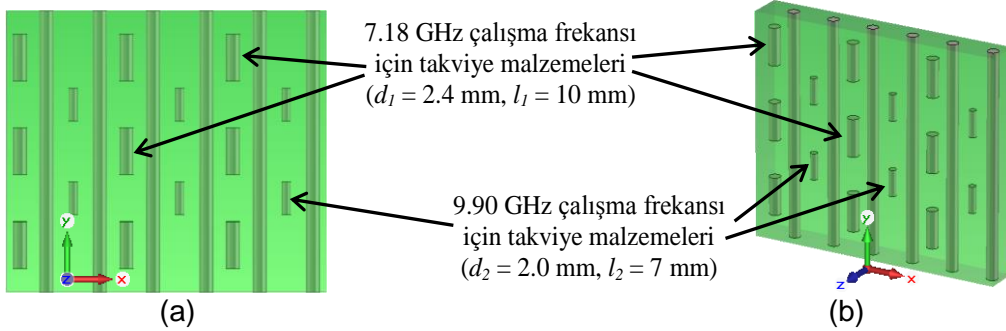
Benzetim sonuçlarının doğrulanması için tasarım parametreleri nümerik analizler ile elde edilen tek-bantlı bant geçiren FSY'nin prototip üretimi gerçekleştirilmiş ve Şekil 18'de gösterilen ölçüm düzeneği kullanılarak iletim parametre değerleri 2 GHz–16 GHz frekans aralığında elde edilmiştir. Şekil 46'da verilen karşılaştırmadan benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmekle birlikte ölçüm sonuçlarında test düzeneğinden kaynaklı istenmeyen dalgalanmalar oluşmaktadır.



Şekil 46. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant geçiren FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.

4.1.4. Metal Fiber Takviyeli Çok-Bantlı Bant Geçiren FSY

Bu proje çalışmanın diğer bir amacı farklı uzunluklarda ve yarıçaplarda takviye malzemelerini bir arada kullanarak farklı frekans değerleri için çok-bantlı bant geçiren FSY'lerin tasarlanmasıdır. Bu amaçla Şekil 47'de verilen özgün modelin parametre değerleri 7.18 GHz ve 9.9 GHz çalışma frekansları için CST MWS programı ile elde edilmiş ve Tablo 6'da listelenmiştir.



Şekil 47. Çok-bantlı bant geçiren FSY'nin tasarım parametreleri (a) ön görünüş, (b) perspektif görünüş.

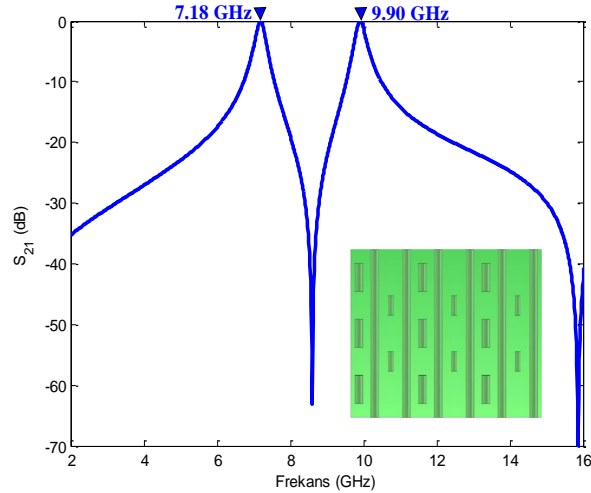
Şekil 47'de verilen modelin bilgisayar tabanlı benzetimler ile elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerleri Şekil 48'de sunulmuştur. Şekil 48'den görüldüğü gibi tasarlanan FSY amacına uygun olarak 7.18 GHz ve 9.9 GHz frekanslarında bant geçiren filtre karakteristiği gösterirken diğer frekanslarda bant durdurucu filtre karakteristiği göstermektedir.

Çok-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim parametre değerlerine ilave olarak FSY'nin çalışma mekanizmasını incelemek için rezonans frekanslarındaki bilgisayar tabanlı benzetim modeli üzerinden 2D elektrik alan dağılımları ile 3D yüzey akım dağılımları Şekil 49'da verilmiştir. Şekil 49'dan 7.18 GHz ve 9.90 GHz frekanslarında FSY'nin 2D elektrik alan ile 3D yüzey akım dağılımları üzerinde görülen yüksek elektrik alan ve yüzey akım değerleri

birinci ve ikinci geçirme bantlarında sırasıyla 10 mm ve 7 mm uzunluklu takviyelerin aktif olduğunu göstermektedir.

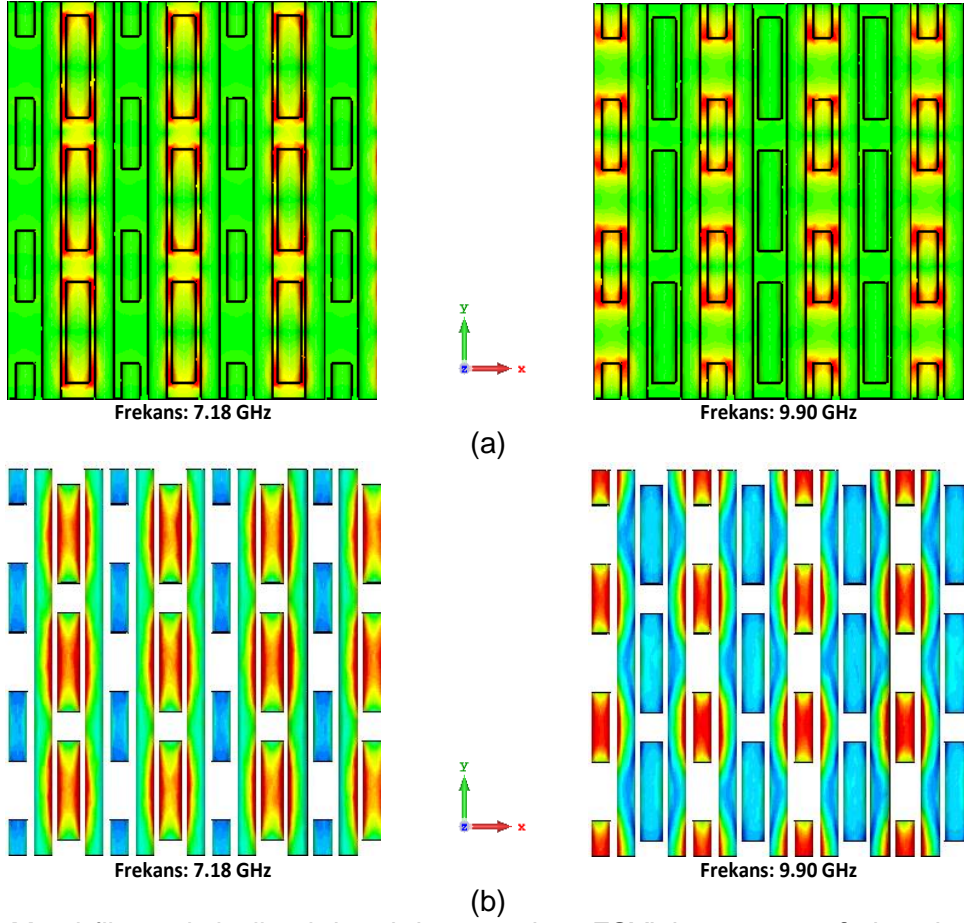
Tablo 6. 7.18 GHz ve 9.90 GHz çalışma frekansları için metal fiber takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre değerleri

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d_1	7.63 GHz çalışma frekansı için takviye malzemelerinin çapı	2.4 mm
d_2	10.50 GHz çalışma frekansı için takviye malzemelerinin çapı	2.0 mm
l_1	7.63 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	10 mm
l_2	10.50 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	7 mm
s_1	7.63 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki düşey boşluklar	3 mm
s_2	10.50 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin arasındaki düşey boşluklar	6 mm
w_1	7.63 GHz çalışma frekansı için takviye malzemelerinin arasındaki yatay boşluklar	0.5 mm
w_2	7.63 GHz çalışma frekansı için takviye malzemelerinin arasındaki yatay boşluklar	0.7 mm
t	tutucu malzemenin kalınlığı	5 mm
σ	takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	3.56×10^7 S/m
ϵ_r	tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	2.9

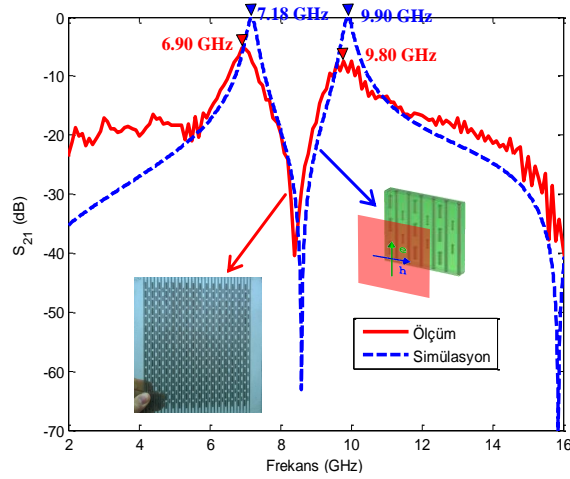


Şekil 48. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.

Çalışma frekanslarındaki elektrik alan ve yüzey akım dağılımları incelenen çok-bantlı bant geçiren FSY'nin benzetim sonuçlarının doğrulanması için prototipi üretilmiş ve elektriksel testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları Şekil 50'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadan sonuçların birbiri ile örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 49. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin rezonans frekanslarındaki (a) 2D elektrik alan (b) 3D yüzey akım dağılımları.



Şekil 50. Metal fiber takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.

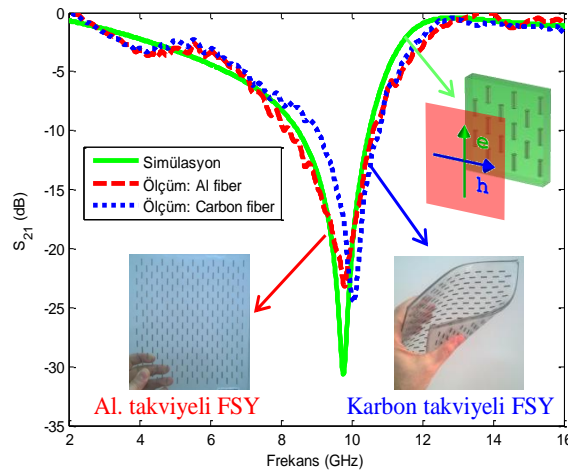
4.2. Karbon Fiber Takviyeli FSY'ler için Elde Edilen Bulgular

Metal fiber takviyeli FSY'lerin istenilen çalışma frekansı için benzetimlerden elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ölçümler ile doğrulandıktan sonra proje kapsamında karbon

fiber takviyeli bant durdurucu FSY tasarımına geçilmiştir. Yapılan araştırmalarda 2 mm çap genişliğine sahip dairesel kesitli karbon fiberlerin piyasada yaygın olarak bulunduğu tespit edilmiştir. Bundan dolayı Şekil 23’de verilen FSY modelinin 9.75 GHz çalışma frekansı için parametre değerleri 2 mm çap genişliğine sahip takviye malzemeleri baz alınarak elde edilmiştir. Karbon fiber takviyeli bant durdurucu FSY’nin benzetim ortamında elde edilen tasarım değerleri ile frekansa bağlı iletim ve yansıma katsayıları sırası ile Tablo 7 ve Şekil 51’de verilmiştir.

Tablo 7. 9.75 GHz çalışma frekansı için karbon fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY’nin parametre değerleri.

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d	takviye malzemelerinin çapı	2 mm
l	sürekli takviye malzemelerinin uzunlukları	10 mm
s	sürekli takviye malzemelerinin arasındaki dikey boşluklar	10 mm
w	sürekli takviye malzemelerinin arasındaki yatay boşluklar	6.5 mm
t	tutucu malzemenin kalınlığı	4 mm
σ	takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	3.56×10^7 S/m
ϵ_r	tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	2.9



Şekil 51. Metal fiber takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY’nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile karbon ve alüminyum fiber takviyeli FSY’lerin ölçümler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerlerinin karşılaştırması.

Görüldüğü üzere, düzlem dalga ile uyarılan FSY’nin çalışma frekansı 9.75 GHz ve -10 dB’de bant genişliği 1.75 GHz’dir. Karbon fiber takviyeli bant durdurucu FSY’nin elektriksel performansı benzetimler ile doğrulandıktan sonra protoip üretimine geçilmiştir. Takviye malzeme türünün FSY’nin elektriksel performansı üzerindeki etkisinin karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi için karbon takviyeli FSY ile aynı tasarım parametrelerine sahip alüminyum

takviyeli FSY'nin de üretimi yapılmıştır. Ayrıca, Gereç ve Yöntem kısmında detaylı olarak açıklandığı gibi karbon fiber takviyeli kompozit FSY'nin üretimlerinde tutucu malzemenin sertleştirici oranı azaltılarak FSY'nin esnek ve bükülebilir olup eğimli radom yüzey uygulamalarında da kullanılması hedeflenmiştir.

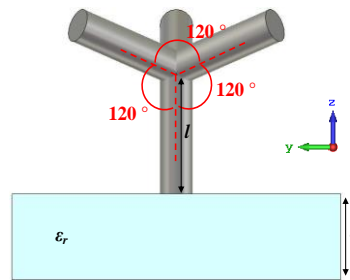
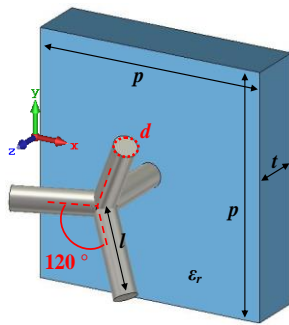
Prototip üretimleri tamamlanan FSY'lerin Şekil 21'de verilen serbest uzay test düzeneği kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları Şekil 51'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadan, karbon takviyeli FSY'nin 10.06 GHz rezonans frekansında 1.75 GHz bant genişliğine sahip olduğu görülürken alüminyum takviyeli FSY'nin ise 9.78 GHz rezonans frekansında 2.35 GHz bant genişliğine sahip olduğu görülmektedir. Çalışma frekansları arasındaki 280 MHz'lik farkın karbon takviyeli FSY'nin üretiminde kullanılan sertleştirici oranının artırılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bilindiği gibi reçine/sertleştirici oranının değiştirilmesi, tutucu malzemenin dielektrik sabitini etkileyerek süresiz karbon takviyeler arasındaki yatay ve düşey düşey boşlukların oluşturduğu kapasitans değerlerini değiştirmekte ve FSY'nin çalışma frekansının farklı frekanslara kaymasına sebep olmaktadır.

4.3. Metal Tripod Takviyeli FSY'ler için Elde Edilen Bulgular

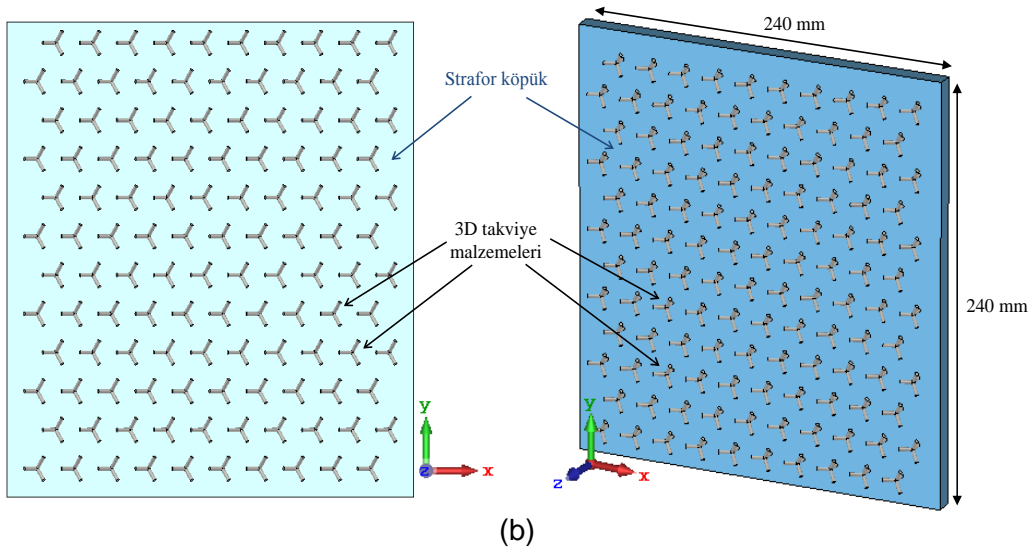
Proje kapsamında prototip üretimleri yapılan iletken fiber takviyeli FSY'ler üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçlarının nümerik analiz sonuçları ile uyum içinde oldukları görüldükten sonra polarizasyon bağımsız metal tripod takviyeli bant durduran FSY tasarımlarına geçilmiştir.

4.3.1. Metal Tripod Takviyeli Tek-Bantlı Bant Durduran FSY

Şekil 52'den görüldüğü gibi metal tripod takviyeli bant durduran FSY tasarımı aralarında 120° açı bulunan uzunluğu l ve çapı d olan aksenal simetrik takviyelerin t kalınlıklı ve ϵ_r bağıllı geçirgenlikli tutucu malzemenin üzerine periyodik dizilimlerinden oluşmaktadır. Metal tripod takviyeli bant durduran FSY'nin 10 GHz çalışma frekansı için CST MWS programının PS menüsü kullanılarak elde edilen tasarım parametre değerleri Tablo 8'de listelenmiştir.



(a)

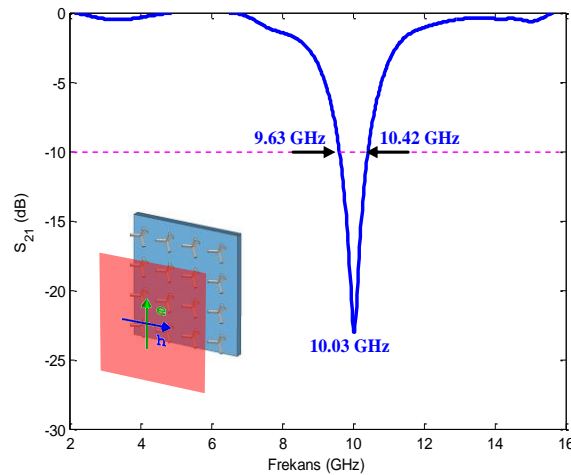


Şekil 52. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin (a) tasarım parametreleri, (b) panel boyutları.

Tablo 8. 10 GHz çalışma frekansı için metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin parametre değerleri

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d	takviye malzemelerinin çapı	2 mm
l	süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	7 mm
p	süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşluklar	10 mm
t	tutucu malzemenin kalınlığı	10 mm
σ	takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	3.56×10^7 S/m
ϵ_r	tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	1.0

Tablo 8'de verilen parametre değerlerine sahip 22.5 cm x 21.5 cm boyutlarındaki FSY'nin benzetim ortamında elde edilen frekansa bağlı iletim katsayıları Şekil 53'de verilmiştir.



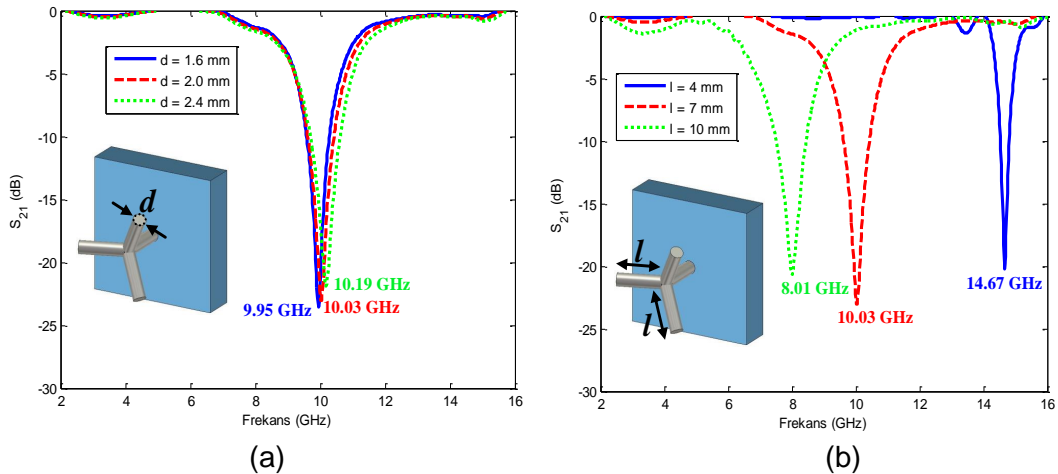
Şekil 53. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları değerleri.

Şekil 53'den düzlem dalga ile uyarılan FSY'nin 10 GHz merkez frekansında ve 790 MHz bant genişliğinde bant durduran filtre karakteristiği gösterdiği görülmektedir. Metal tripod takviyeli bant durduran FSY'nin frekans cevabı bilgisayar tabanlı benzetim modeli üzerinden doğrulandıktan sonra tasarım parametre değerlerinin çalışma frekansı üzerindeki etkilerinin irdelenmesi amacıyla Tablo 9'da listelenen parametre değerlerine karşılık gelen frekans cevapları karşılaştırılmıştır.

Tablo 9. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin parametre analizlerinde kullanılan değerler

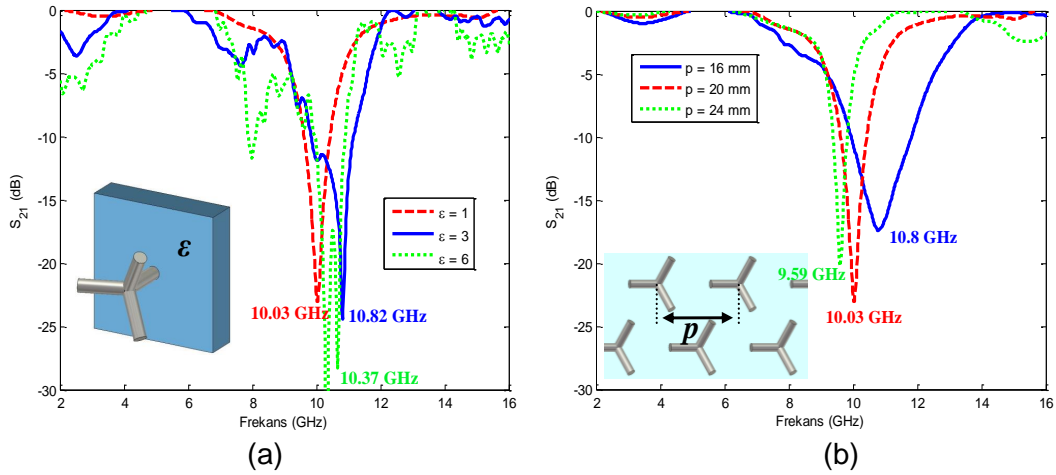
d (mm)	l (mm)	p (mm)	ϵ_r
2	7	20	1.0
1.6	7	20	1.0
2.4	7	20	1.0
2	4	20	1.0
2	10	20	1.0
2	7	16	1.0
2	7	24	1.0
2	7	20	3.0
2	7	20	6.0

Parametre analizlerine ilk olarak tripod takviye malzemelerinin çapı d'nin değiştirilmesi ile başlanmıştır. Şekil 54a'dan görüldüğü gibi, 1.6 mm, 2.0 mm ve 2.4 mm çapındaki takviyeler ile gerçekleştirilen analizlerde sonuçlar birbirine yakın çıkmakla birlikte, takviye çapı ile çalışma frekansı aynı yönlü hareket etmektedir. Parametre analizlerine takviye malzemelerinin uzunluklarının FSY'nin çalışma frekansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi ile devam edilmiştir. Şekil 54b'de verilen karşılaştırmadan takviyelerin boyları ile çalışma frekansının ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir.



Şekil 54. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) takviye malzemelerinin farklı çapları (b) takviye malzemelerinin farklı uzunlukları için.

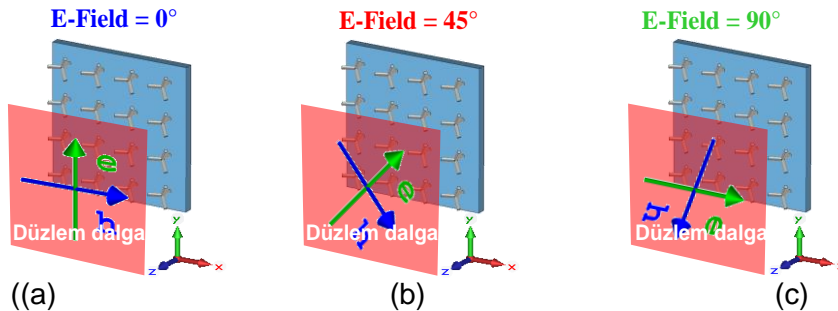
Parametre analizleri kapsamında incelenen üçüncü parametre tutucu malzemenin dielektrik sabiti olmuştur. Şekil 55a'da verilen karşılaştırmadan açıkça görüldüğü gibi tutucu malzemenin dielektrik sabiti 1.0, 3.0 ve 6.0 olarak değiştiğinde FSY'nin çalışma frekansı sırası ile 10.03 GHz, 10.82 GHz ve 10.37 GHz olmaktadır. Son olarak takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşlukların FSY'nin elektriksel performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine nümerik çalışmalar yapılmıştır. Şekil 55b'den takviye malzemeleri arasındaki eşit olan yatay ve düşey boşlukların artmasının çalışma frekansını düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 55. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayıları (a) tutucu malzemenin farklı dielektrik değerleri için (b) takviye malzemeleri arasındaki uzaklıkların farklı değerleri için.

4.3.1.1. Elektromanyetik Dalganın Farklı Geliş Açılarında Karşılık Metal Tripod Takviyeli FSY'nin Frekans Cevabı

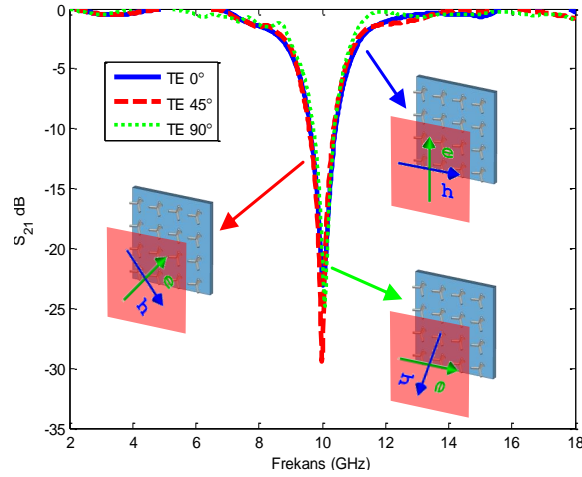
Parametre analizinden sonra EM dalganın farklı polarizasyonlarının metal tripod takviyeli FSY'nin çalışma frekansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 56'da gösterildiği gibi düzlem EM dalga $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ olmak üzere üç farklı açıda yönlendirilmiştir.



Şekil 56. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin farklı polarizasyonlardaki EM dalga ile uyarımı (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 45^\circ$ ve (c) $\theta = 90^\circ$.

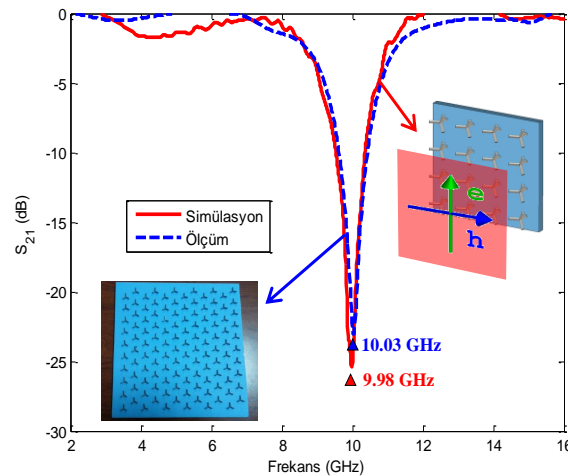
Şekil 57'de verilen benzetim sonuçlarından EM dalganın tüm polarizasyonları için ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$) metal tripod takviyeli FSY'nin frekans cevabının değişmediği ve tasarım

amacına uygun olarak polarizasyon bağımsız bir bant durduran filtre karakteristiği gösterdiği görülmüştür.



Şekil 57. Farklı polarizasyonlardaki EM dalga'nın metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayılarına etkisinin nümerik analiz sonuçları.

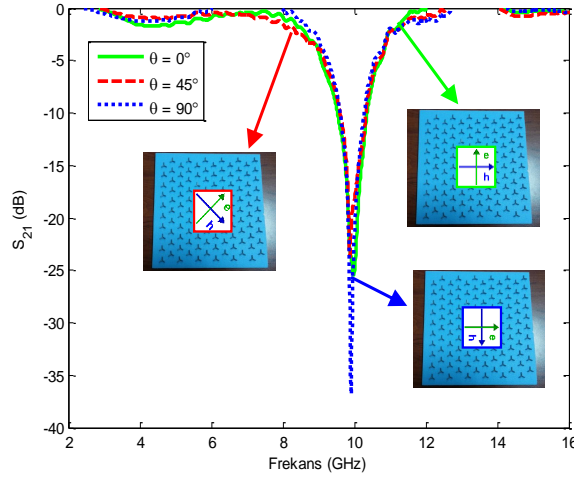
Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin elektriksel performansı benzetimler ile elde edildikten sonra detayları Gereç ve Yöntem kısmında verilen prototip üretim aşamalarına geçilmiştir. Bu amaçla ilk olarak ayırık tripod takviyeler Şekil 13'de verilen 22.5 cm x 21.5 cm boyutlarındaki strafor köpük üzerine benzetim ortamındaki tasarımlara uygun olarak yerleştirilmiş ve daha sonra Şekil 21'de verilen serbest uzay ölçüm metodu kullanılarak 2 GHz–16 GHz frekans aralığında iletim parametre değerleri elde edilmiştir. Şekil 58'de verilen karşılaştırmadan benzetim sonuçları ile ölçüm sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 58. Metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durduran FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.

Proje kapsamında metal tripod takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY tasarımlarına geçmeden önce Şekil 57'de verilen benzetim sonuçlarının da doğrulanması amacıyla ölçümler EM dalganın $\theta = 0^\circ$, $\theta = 45^\circ$ ve $\theta = 90^\circ$ polarizasyonları için tekrarlanmış ve elde

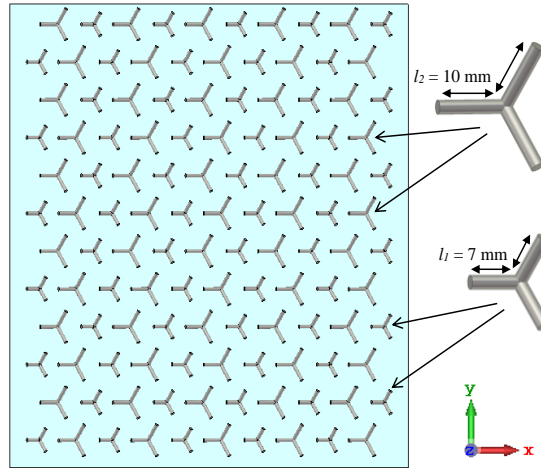
edilen sonuçlar Şekil 59'da sunulmuştur. Şekil 57 ile Şekil 59 karşılaştırıldığında EM dalganın tüm polarizasyonları için ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçlarını doğruladığı görülmüştür.



Şekil 59. Farklı polarizasyonlardaki EM dalganın metal tripod takviyeli tek-bantlı bant durdurucu FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayılarına etkisinin ölçüm sonuçları.

4.3.2. Metal Tripod Takviyeli Çok Bantlı Bant Durdurucu FSY

Polarizasyon bağımsız tek-bantlı bant durdurucu FSY'lerin istenilen çalışma frekansı için modellemeleri ve analizleri yapıldıktan sonra farklı frekanslarda çalışan antenlerden oluşmuş sistemler için çok-bantlı bant durdurucu FSY tasarımlarına geçilmiştir. Bu amaçla Şekil 60'da verilen özgün modelin parametre değerleri 6.48 GHz ve 8.38 GHz çalışma frekansları için CST MWS programı ile elde edilmiş ve Tablo 10'da listelenmiştir.

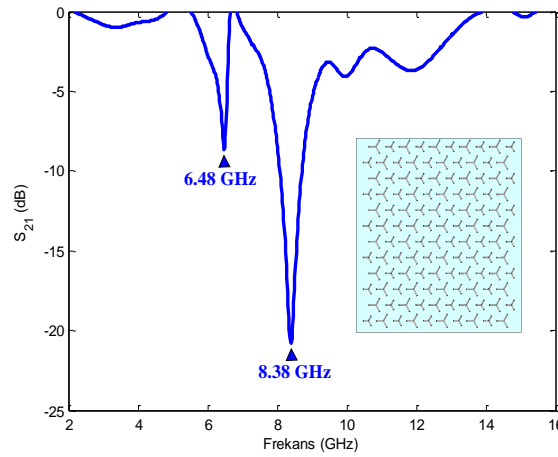


Şekil 60. Metal tripod takviyeli çok-bantlı bant durdurucu FSY'nin tasarım parametreleri.

Şekil 60'da verilen modelin bilgisayar tabanlı benzetimler ile elde edilen frekansa bağlı iletim parametre değerleri Şekil 61'de sunulmuştur. Şekil 61'den görüldüğü gibi tasarlanan FSY amacına uygun olarak 6.48 GHz ve 8.38 GHz frekanslarında bant durdurucu filtre karakteristiği gösterirken diğer frekanslarda bant geçiren filtre karakteristiği göstermektedir.

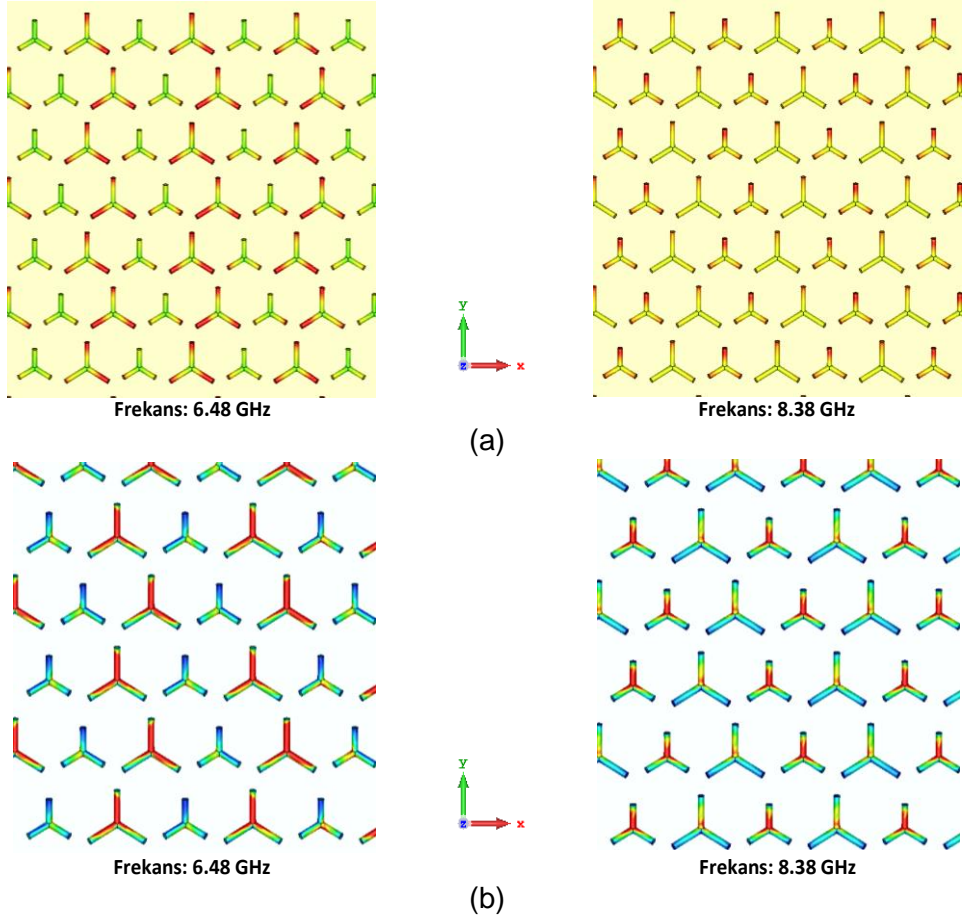
Tablo 10 6.48 GHz ve 8.38 GHz çalışma frekansları için metal tripod takviyeli çok-bantlı bant geçiren FSY'nin parametre değerleri.

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d	takviye malzemelerinin çapı	2 mm
l_1	6.48 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	7 mm
l_2	8.38 GHz çalışma frekansı için süreksiz takviye malzemelerinin uzunlukları	10 mm
p	süreksiz takviye malzemeleri arasındaki yatay ve düşey boşluklar	20 mm
t	tutucu malzemenin kalınlığı	10 mm
σ	takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	3.56×10^7 S/m
ϵ_r	tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	2.9



Şekil 61. Metal tripod takviyeli çok-bantlı bant durdurucu FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.

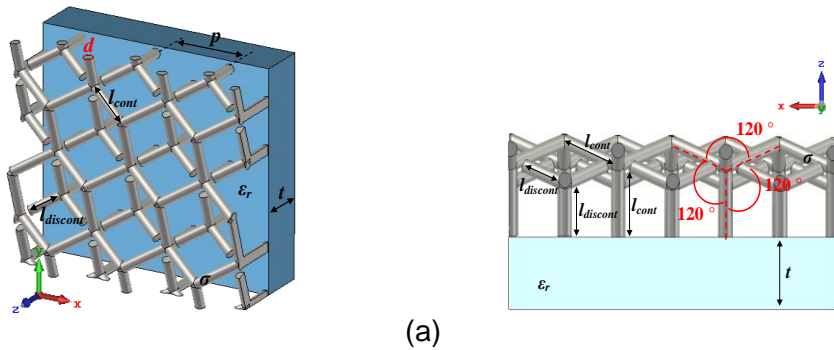
Çok-bantlı bant durdurucu FSY'nin frekansa bağlı iletim parametre değerlerine ilave olarak FSY'nin çalışma mekanizmasını incelemek için rezonans frekanslarındaki bilgisayar tabanlı benzetim modeli üzerinden 2D elektrik alan dağılımları ile 3D yüzey akım dağılımları Şekil 62'de verilmiştir. Şekil 62'den 6.48 GHz ve 8.38 GHz frekanslarında FSY'nin 2D elektrik alan ile 3D yüzey akım dağılımları üzerinde görülen yüksek elektrik alan ve yüzey akım değerleri birinci ve ikinci geçirme bantlarında sırasıyla 10 mm ve 7 mm uzunluklu tripod takviyelerin aktif olduğunu göstermektedir.



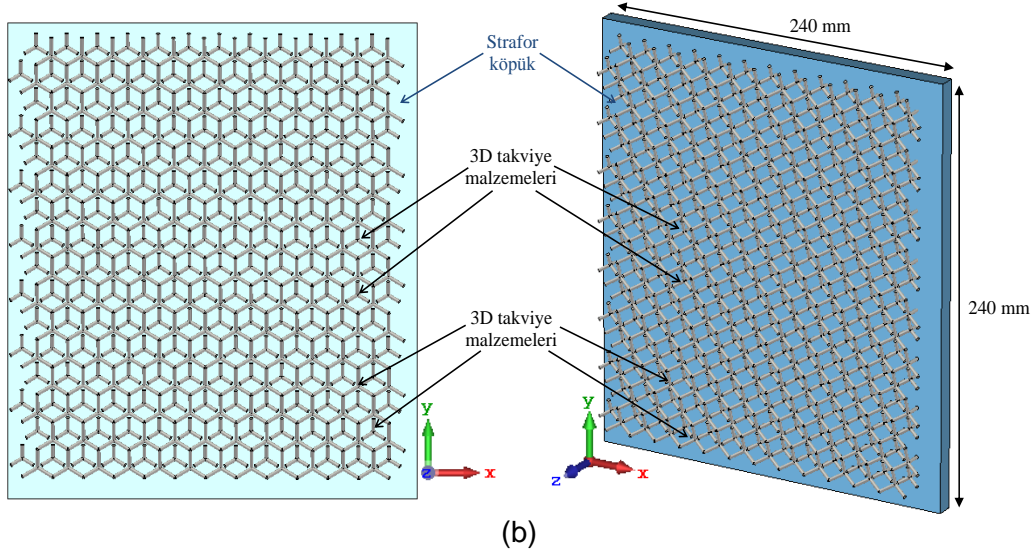
Şekil 62. Metal tripod takviyeli çok-bantlı bant durduran FSY'nin rezonans frekanslarındaki (a) 2D elektrik alan (b) 3D yüzey akım dağılımları.

4.3.3. Metal Tripod Takviyeli Geniş-Bantlı Bant Durduran FSY

Günümüzde artan veri kullanımına bağlı olarak geniş bant gerektiren uygulamaların çoğalmasından dolayı proje kapsamında metal tripod takviyeli tek-bantlı bantlı bant durduran FSY'nin bant genişliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, Şekil 63'de verilen bitişik ve ayrı metal tripod takviye malzemeleri içeren özgün FSY modeli önerilmiştir. Önerilen modelin 9.03 GHz–12.73 GHz çalışma frekans aralığı için tasarım parametre değerleri CST MWS programının PS menüsü kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 11'de listelenmiştir. Tablo 11'de verilen parametre değerlerine sahip geniş-bantlı bant durduran FSY'nin benzetim ortamında elde edilen frekansa bağlı iletim ve yansıma katsayıları Şekil 64'de verilmiştir.



(a)

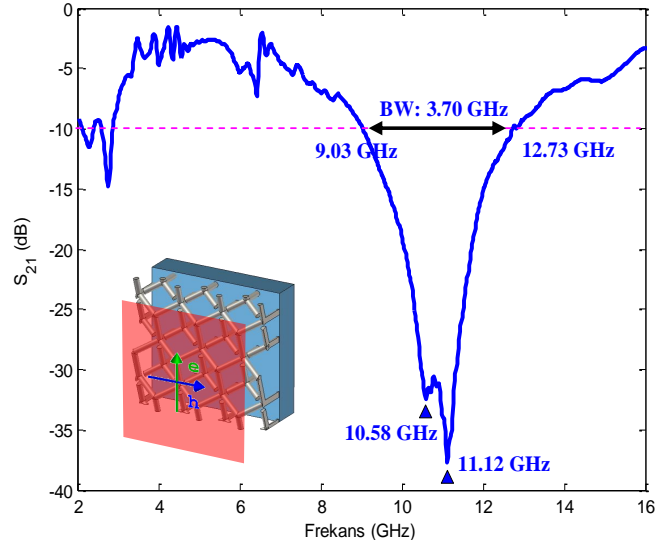


Şekil 63. Metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durdurucu FSY'nin (a) tasarım parametreleri, (b) panel boyutları.

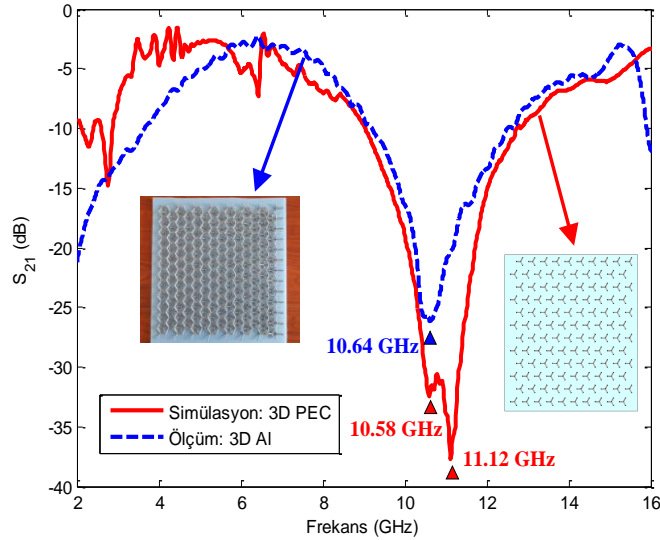
Tablo 11 10.5 GHz çalışma frekansı için metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durdurucu FSY'nin parametre değerleri.

Parametre	Parametre açıklaması	Parametre değeri
d	takviye malzemelerinin çapı	2 mm
l_{cont}	ayrık takviye malzemelerinin uzunlukları	10 mm
$l_{discont}$	bitişik takviye malzemelerinin uzunlukları	7 mm
P	sürekli takviye malzemeleri arasındaki yatay ve dikey boşluklar	16.38 mm
t	tutucu malzemenin kalınlığı	10 mm
σ	takviye malzemelerinin elektriksel iletkenliği	3.56×10^7 S/m
ϵ_r	tutucu malzemenin bağıl geçirgenliği	1.0

Şekil 64'den görüldüğü gibi düzlem dalga ile uyarılan FSY'nin merkez frekansı ile -10 dB bant genişliği sırasıyla 10.88 GHz ve 3.7 GHz olarak elde edilmiştir. Şekil 64'de verilen benzetim sonuçlarının doğrulanması için geniş-bantlı bant durdurucu FSY'nin prototipi Şekil 17'de sunulan üretim aşamaları kullanılarak üretilmiş ve elektriksel testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen frekansa bağlı ölçüm sonuçları ile benzetim sonuçları Şekil 65'de karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmadan sonuçların birbiri ile örtüştüğü görülmüştür.



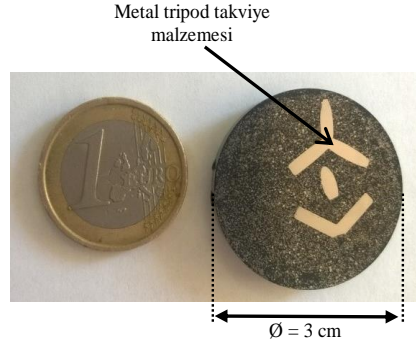
Şekil 64. Metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durduran FSY'nin frekansa bağlı iletim katsayı değerleri.



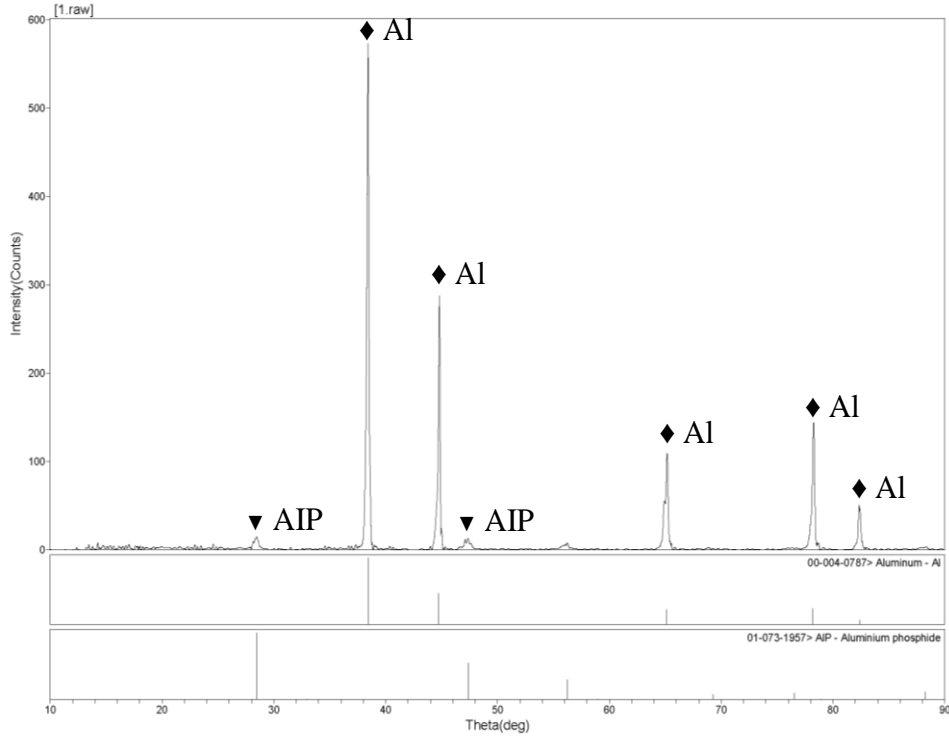
Şekil 65. Metal tripod takviyeli geniş-bantlı bant durduran FSY'nin nümerik analizler sonucu elde edilen frekansa bağlı iletim değerleri ile ölçüm sonuçlarının karşılaştırması.

4.4. Takviye Malzemelerinin Mekanik Testleri Sonucu Elde Edilen Bulgular

Proje çalışmasında prototipleri üretilen FSY'lerin elektriksel performansları incelendikten sonra üretimlerde kullanılan takviye malzemelerinin mekanik performanslarının belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan DMLS metodu kullanılarak üretilen metal tripod takviye malzemelerinin XRD ve SEM analizleri ile detaylı incelemelerinin yapılabilmesi için ilk olarak Şekil 66'da verilen numune hazırlanmıştır. Daha sonra numunenin XRD spektrumuna bakılmış ve elde edilen kırınım deseni Şekil 67'de verilmiştir. Şekil 67 detaylı incelendiğinde, baskın alüminyum fazları ile birlikte zayıf alüminyum fosfor (AIP) fazlarının da olduğu görülmüştür. X-ışınlarının kırınım deseninde maksimum piklere karşılık gelen açı değerleri ile piklerin şiddetleri Tablo 12'de listelenmiştir.



Şekil 66. Metal tripod takviye malzemelerinin XRD ve SEM analizleri ile detaylı incelemelerinin yapılabilmesi için hazırlanan numune.

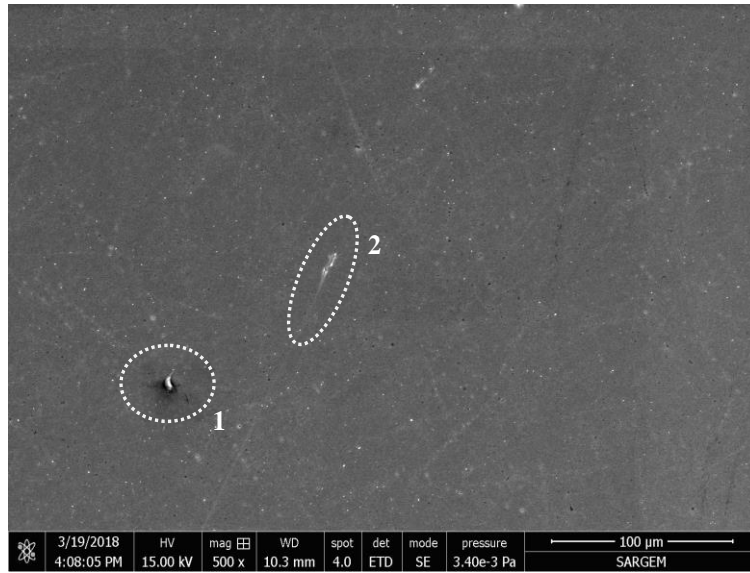


Şekil 67. DMLS metodu ile üretilen metal tripod takviye malzemelerinin X-ışını kırınım deseni.

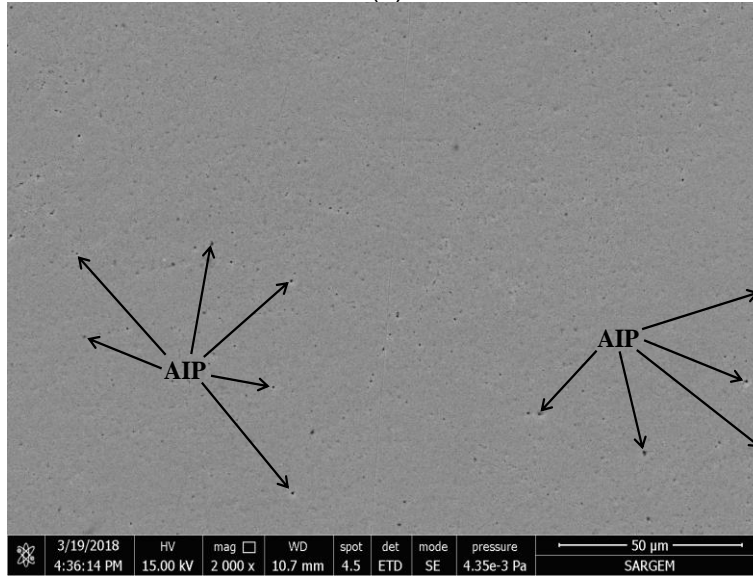
Tablo 12. Metal tripod takviye malzemelerinin X-ışını kırınım deseninde maksimum piklere karşılık gelen açılar ile piklerin şiddetleri.

#	2 θ	Şiddet	Şiddet %	Faz
1	14.256	7	1.2	-
2	17.041	5	0.8	-
3	24.579	5	1.0	-
4	28.479	13	2.3	AIP
5	38.419	571	100.0	Alüminyum
6	44.798	287	50.2	Alüminyum
7	47.101	11	2.0	-
8	47.360	12	2.1	AIP
9	64.920	55	9.6	-
10	65.178	108	19.0	Alüminyum
11	78.260	143	25.0	Alüminyum
12	82.321	50	8.8	Alüminyum

Numune üzerine konumlandırılan metal tripod takviyenin 0.5 Kx ve 2.00 Kx büyütme oranlarında çekilmiş olan SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 68a ve Şekil 68b'de gösterilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde metal takviyelerin içinde katkı maddelerinin varlığı görülmüştür. Bu katkı maddelerinin Şekil 67'de verilen XRD analiz sonuçlarında ortaya konulan AIP'ler olduğu ve metal tripodların sertliklerinin artırılması için kullanıldıkları düşünülmekle birlikte SEM görüntüleri XRD analiz sonuçlarını desteklemiştir. Ayrıca, Şekil 68a'da gösterilen 1. ve 2. bölgelerin farklı katkı malzemeleri veya numunenin hazırlanması sırasında zımparalamadan kaynaklanan izler olup olmadığının araştırılması için Back-Scatter Electron (BSE) detektörü ile 0.5 Kx büyütme oranında görüntü alınmış (Şekil 69) ve 1. ve 2. bölgelerin zımparalamadan kaynaklanan izler olduğu rapor edilmiştir.

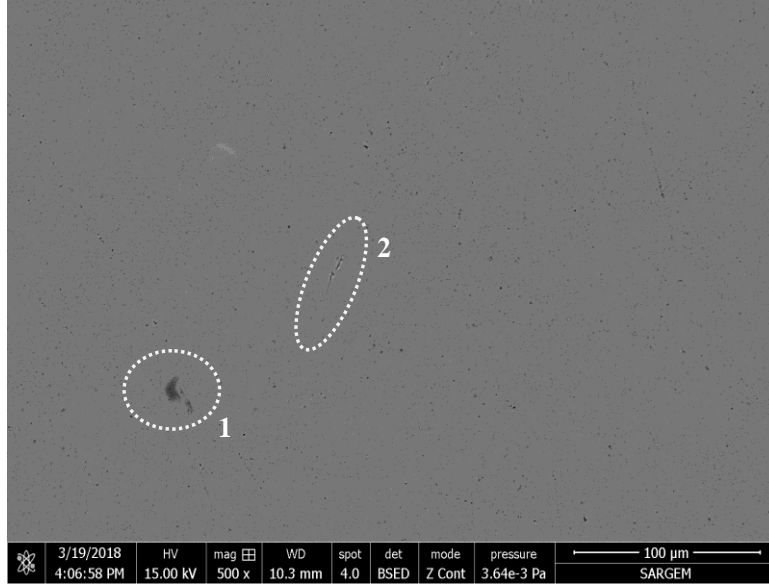


(a)



(b)

Şekil 68. DMLS metodu ile üretilen metal tripod takviye malzemelerinin (a) 0.5 Kx ve (b) 2.00 Kx büyütme oranlarında SEM görüntüleri.

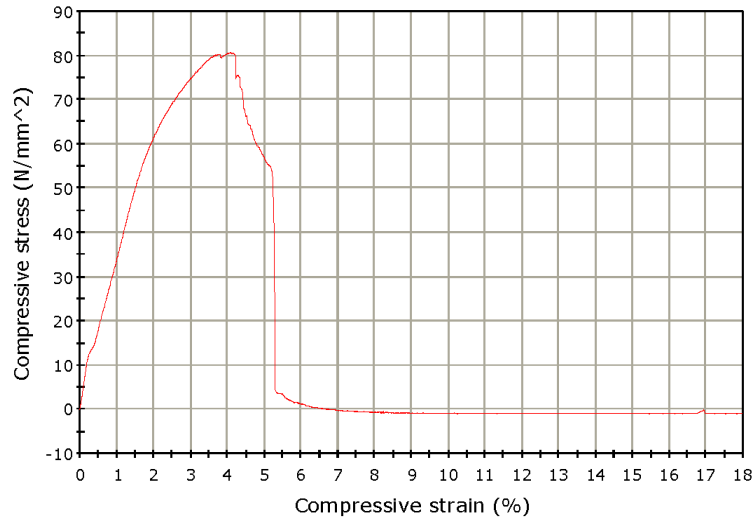


Şekil 69. DMLS metodu ile üretilen metal tripod takviye malzemelerinin Back-Scatter Electron (BSE) detektörü ile 0.5 Kx büyütme oranında SEM görüntüsü.

Mekanik testlerin üçüncü aşamasında ayırık metal tripod takviye malzemelerin deformasyon kabiliyetinin incelenmesi için Şekil 70'de gösterilen numuneye basma deneyi uygulanmıştır. Deney sonucu elde edilen gerilme-birim uzama eğrisi Şekil 71'de verilmiştir. Şekil 71'den ayırık tripod takviye malzemelerin basma dayanımlarının 80.65 MPa olduğu görülmüştür.

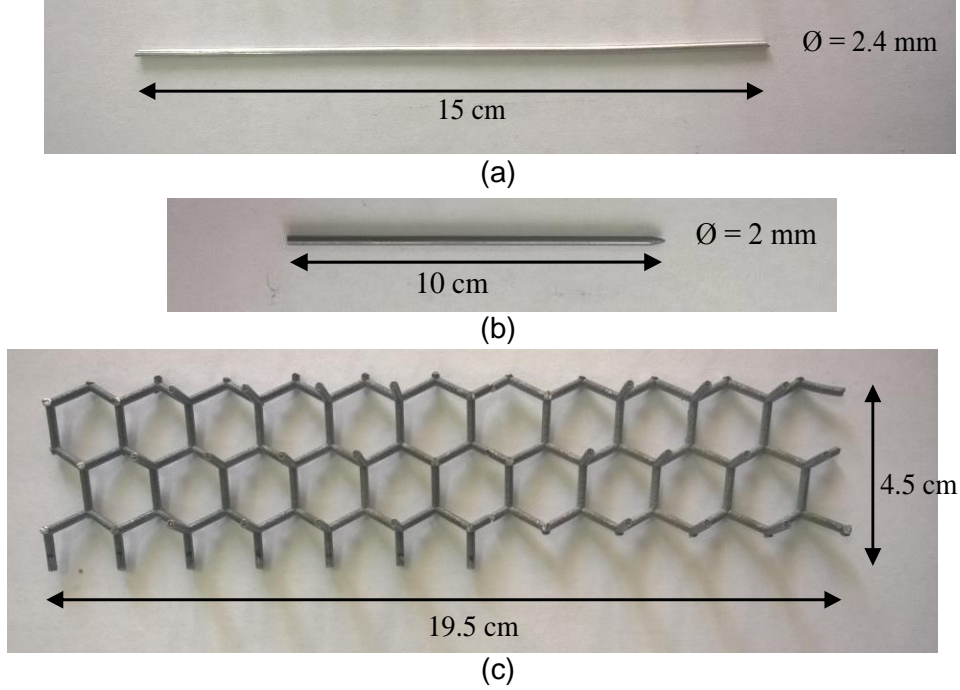


Şekil 70. Basma deneyinde kullanılan ayırık metal tripod takviye numunesi.

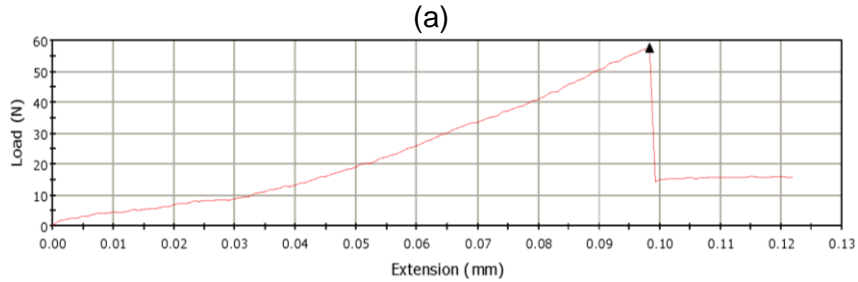
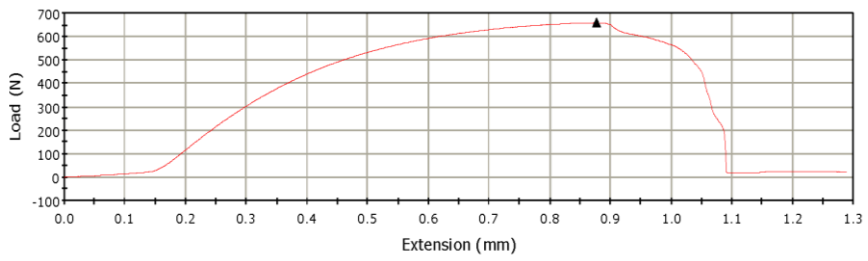


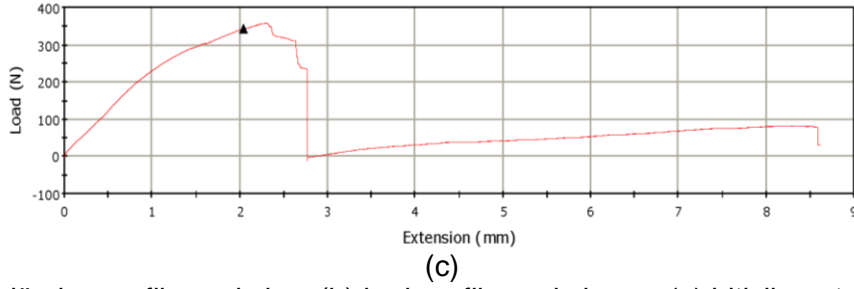
Şekil 71. Ayırık metal tripod takviye malzemesinin basma deney sonucu.

Mekanik testlerin son aşamasında FSY'lerin prototip üretimlerinde kullanılan alüminyum ve karbon fiberler ile metal tripod takviye malzemelerinin statik yükleme koşulları altında mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla boyutları Şekil 72'de verilen numunelere çekme deneyleri uygulanmıştır. Çekme deney sonuçlarından alüminyum ve karbon fiberler ile metal tripod takviye malzemelerinin sırasıyla 650 N, 55 N ve 350 N taşıma kapasitelerine ve 227.781 N/mm², 16.6242 N/mm² ve 26.243 N/mm² kopma gerilmelerine sahip oldukları rapor edilmiştir. Elde edilen kuvvet-uzama grafikleri Şekil 73'de sunulmuştur.



Şekil 72. Çekme deneylerinde kullanılan (a) alüminyum fiber takviye, (b) karbon fiber takviye ve (c) metal tripod takviye malzeme numuneleri.





Şekil 73. a) alüminyum fiber takviye, (b) karbon fiber takviye ve (c) bitişik metal tripod takviye malzemelerinin çekme deney sonuçları.

Çekme deney sonuçlarına göre elde edilen ve Şekil 73'de verilen kuvvet-uzama eğrileri incelendiğinde karbon fiber takviye malzemesine ait sonuçlarının alüminyum fiber takviye ve bitişik metal tripod takviye malzemelerinin çekme deney sonuçları ile bazı farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir. Karbon fiber takviye malzemesine kopana kadar uygulanan kuvvet diğer iki örnek için uygulanan kuvvete göre nispeten azdır. Karbon fiber takviye malzemesine uygulanan kuvvet küçüktür ve bu kuvvete karşı oluşan uzama kuvvetle doğru orantılıdır. Bu durum malzemenin elastik davranış içinde olduğunu gösterir. Uygulanan kuvvet artırıldığında örnek uyarı vermeden aniden kırılmaktadır. Buna göre karbon fiber takviye malzemesinin gevrek olduğu yorumu yapılabilir. Diğer taraftan alüminyum fiber takviye ve bitişik metal tripod takviye malzemeleri sünektir. Yani alüminyum fiber takviye ve bitişik metal tripod takviye malzemeleri kopana kadar daha fazla enerji soğurur ve daha fazla deforme olur. Ayrıca bu malzemelerde ortaya çıkan deformasyonlar kalıcıdır.

5. SONUÇ

Proje kapsamında ilk olarak epoksi tutucu malzeme içine süreksiz metal fiber takviyelerin periyodik dizilimi ile oluşturulan 9.5 GHz merkez frekansında bant durduran filtre karakteristiğine sahip FSY tasarlanmıştır. Daha sonra bant durduran FSY tasarımında kullanılan takviye malzemelerinin çapı ve uzunluğu, tutucu malzemenin kalınlığı ve bağlı geçirgenliği vb. parametrelerin çalışma frekansı üzerindeki etkileri benzetimler ile incelenmiştir. Benzetim sonuçlarının doğrulanması için elle yatırma yöntemi kullanılarak tek-bantlı bant durduran FSY'nin üretimi yapıp serbest uzay ölçüm düzeneği ile frekansa bağlı iletim parametre değerleri elde edilmiştir. FSY'nin ölçümlerden elde edilen çalışma frekans değeri benzetim sonuçları ile karşılaştırıldığında maksimum bağlı hata oranı %1.5 olarak hesaplanmıştır. Projenin ikinci aşamasında günümüzde farklı frekanslarda çalışan antenlerin bir arada kullanıldığı sistemlerin varlığı düşünülerek tek-bantlı bant durduran FSY'nin çoklu bant özelliği göstermesi hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı uzunluk ve çaplara sahip takviye malzemeleri bir arada kullanılarak 7.63 GHz ve 10.50 GHz çalışma frekansları için bant durduran filtre karakteristiğine sahip özgün çok-bantlı bant durduran FSY tasarlanmıştır. Daha sonra benzetimler ile parametre değerleri elde edilen bant durduran FSY'nin prototip üretimi yapılarak elektriksel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçlarının benzetim sonuçları ile karşılaştırmalarından birinci ve ikinci durdurma bantlarının merkez frekansları için maksimum bağlı hata oranlarının sırasıyla %3.01 ve %1.90 olduğu görülmüştür.

Projenin sonraki aşamasında periyodik süreksiz metal fiber takviyelerin arasına sürekli takviyelerin ilave edilmesi ile 9.68 GHz çalışma frekansında bant geçiren filtre karakteristiğine sahip özgün FSY modeli tasarlanmış ve parametre analizleri yapılmıştır. Bant durduran FSY tasarımlarında göz önüne alındığı gibi bant-geçiren FSY'nin de çoklu bant özelliği göstermesi için farklı uzunluk ve çaplara sahip süreksiz takviye malzemeleri bir arada kullanılarak 7.18 GHz ve 9.90 GHz çalışma frekanslarında bant geçiren FSY tasarlanmıştır. Tasarımları yapılan FSY'lerin prototipleri üretilerek elektriksel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırıldığında bant geçiren FSY için %4.95 maksimum bağlı hata oranı elde edilirken bant geçiren FSY'nin birinci ve ikinci geçirme bantlarında sırasıyla %3.89 ve %1.10 maksimum bağlı hata oranları elde edilmiştir.

Projenin ilerleyen aşamalarında metal takviye malzemeleri yerine sağladıkları üstün mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı kullanımları yaygınlaşan karbon takviye malzemelerinin FSY tasarımında kullanılması hedeflenmiştir. Bu amaçla 9.75 GHz çalışma frekansına sahip bant durduran FSY üretimi sonlu uzunlukta süreksiz karbon takviye malzemeleri ile gerçekleştirilmiştir. Karbon takviye malzemelerinin FSY'nin elektriksel performansı üzerindeki etkilerinin daha iyi incelenebilmesi için aynı tasarım parametrelerine sahip alüminyum

takviyeli FSY'nin üretimi de yapılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları benzetim sonuçları ile karşılaştırıldığında karbon ve alüminyum takviyeli FSY'lerin merkez frekansları için sırasıyla %3.17 ve %0.03 maksimum bağıl hata oranları elde edilmiştir. Bağıl hata oranları arasındaki %3.14'lük farkın karbon takviyeli FSY'nin esnek ve bükülebilir olup eğimli radom yüzey uygulamalarında da kullanılması için üretiminde sertleştirici oranının azaltılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Projenin son aşamasında polarizasyon bağımsız metal tripod takviyeli FSY tasarımları sunulmuştur. Eklemeli imalat teknolojilerinden biri olan doğrudan metal lazer sinterleme metodu kullanılarak üretilen tripod takviye malzemeleri benzetim modeline uygun olarak tutucu malzeme içine konumlandırılıp frekansa bağlı iletim parametre değerleri elde edilmiştir. Metal tripod takviyeli FSY'nin 10 GHz çalışma frekansı için %0.30 maksimum bağıl hata oranı hesaplanmıştır.

Yapılan elektriksel çalışmalara ek olarak, üretimlerde kullanılan takviye malzemelerinin mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. Mekanik testlerde ilk olarak DMLS metodu kullanılarak üretilen metal tripod takviye malzemelerinin XRD ve SEM analizleri ile detaylı incelemeleri yapılmış ve elde edilen kırınım desenlerinden metal takviyelerin içinde baskın alüminyum fazları ile birlikte zayıf alüminyum fosfor (AIP) fazlarının da olduğu görülmüştür. Mekanik testlerin ikinci aşamasında ayrık metal tripod takviye malzemelerin deformasyon kabiliyetinin incelenmesi amacıyla basma testi uygulanmış ve takviyelerin basma dayanımlarının 80.65 MPa olduğu rapor edilmiştir. Mekanik testlerin son aşamasında FSY'lerin prototip üretimlerinde kullanılan alüminyum ve karbon fiberler ile bitişik metal tripod takviye malzemelerinin statik yükleme koşulları altında mekanik özellikleri çekme deneyleri ile belirlenmiş ve sırasıyla 227.781 N/mm², 16.6242 N/mm² ve 26.243 N/mm² kopma gerilme değerleri elde edilmiştir.

Projenin Gereç ve Yöntem bölümünde detaylı olarak açıklandığı gibi tasarımları yapılan fiber takviyeli FSY'lerin prototipleri laboratuvar ortamında elle yatırma yöntemi kullanılarak üretildiğinden dolayı işlenebilirliği kolay olması amacıyla tasarımlarda takviye malzemelerinin fiziksel boyutları milimetrik olarak tanımlanmıştır. Ancak, nano teknolojinin gelişmesine bağlı olarak gittikçe hassaslaşan ve kesinlik oranları artan üretim yöntemleri, cihaz ve ekipmanlar kullanılmak suretiyle tasarım parametre değerleri benzetim ortamında nano boyutlarda elde edilerek daha ince özgün FSY prototipleri geliştirilebilir. Böylece, farklı yönelimlere sahip metal fiber takviyeli FSY'lerin bir arada kullanılmaları ile daha ince polarizasyon bağımsız çok katmanlı kaplama malzemeleri üretilebilir.

Proje kapsamında yapılan çalışmalar sonucu, araştırmacılar bilgisayar tabanlı benzetim modeli oluşturma ve parametre analizlerini yapma, elle yatırma yöntemi ile fiber takviyeli

kompozit panel üretimi, serbest uzay ölçüm metodu kullanarak FSY'lerin frekansa bağlı iletim parametrelerinin ölçülmesi konularında ileri seviyelerde tecrübe ve bilgi birikimi kazanmışlardır.

KAYNAKLAR

- [1] Al-Joumayly, M. A., Behdad, N. 2010. "Low-Profile, Highly-Selective, Dual-Band Frequency Selective Surfaces With Closely Spaced Bands of Operation", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 58, 4042-8.
- [2] Baba, N. H., Awang, Z., Ghodgaonkar, D. K. 2004. "Accuracy Considerations for Dielectric Measurements of Semiconductor Wafers Using Free Space Microwave Measurement System in 8-13 GHz Range", in Proceedings of IEEE International RF and Microwave Conference (RFM), Kuala Lumpur, Malaysia, 177-4.
- [3] Bai, Z., Zhang, Q., Ju, Y., Tao, G., Jiang, X., Kang, N., Liu, C., Zhang, L. 2016. "Flexible Metamaterial Narrow-Band-Pass Filter Based on Magnetic Resonance Coupling Between Ultra-thin Bilayer Frequency Selective Surfaces", Journal of Physics D: Applied Physics, 49 (6), 1-8.
- [4] Baskey, H. B., Ghai, B., Akhtar, M. J. 2015. "A Flexible, Ultra Thin, Frequency-Selective-Surface Based Absorber Film for the Radar Cross Section Reduction of a Cubical Object", in Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC), Hyderabad, India, 128-4.
- [5] Bayatpur, F., Sarabandi, K. 2008. "Single-Layer High-Order Miniaturized-Element Frequency-Selective Surfaces", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 56, 774-7.
- [6] Bineli, A. R. R., Peres, A. P. G., Jardim, A. L., Filho, R. M. 2011. "Direct Metal Laser Sintering (DMLS): In technology for design and construction of microreactors", in Proceedings of 6th Brazilian Conference on Manufacturing Engineering, Caxias do Sul, Brasil, 1-7.
- [7] Boone, W., Sonderen, C. 2015. "Copper in Comparison with Aluminium as Common Material in Conductors of Lv and Mv Cables", in Proceedings of 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, France, 26-5.
- [8] Chen, H., Hou, X., Deng, L. 2009. "Design of Frequency-Selective Surfaces Radome for a Planar Slotted Waveguide Antenna", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 8, 1231-2.
- [9] Coombs, R. 2010. "Comparison of Aluminium vs Copper Power Cables for Use in Industrial Applications", Installations and Contractors, 67-4.
- [10] CST-Computer Simulation Technology. "CST Microwave Studio". <https://www.cst.com/products/cstmws>, Son Erişim Tarihi: 01 Mart 2018.
- [11] Delihacioglu K. 2012. "Frequency Selective Surfaces With Multiple-Strip Group Elements", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 11, 1370-3.

- [12] Dubrovka, R., Vazquez, J., Parini, C., Moore, D. 2006. "Equivalent Circuit Method for Analysis and Synthesis of Frequency Selective Surfaces", IEE in Proceedings of Microwave Antennas Propagation, 153 (3), 213-7.
- [13] Duman, B., Kayacan, M. C. 2017. "Doğrudan Metal Lazer Sinterleme/Ergitme Yöntemi ile İmal Edilecek Parçanın Mekanik Özelliklerinin Tahmini", SDU Journal of Technical Sciences, 7 (1), 12-16.
- [14] Feng, D. 2014. "A new equivalent circuit of miniaturized frequency selective surface," in Proceedings of 3rd Asia-Pacific Conf. Antennas Propag., Harbin, China, 1363-2.
- [15] Ghodgaonkar, D. K., Varadan, V. V., Varadan, V. K. 1989. "A Free-Space Method For Measurement of Dielectric Constants and Loss Tangents at Microwave Frequencies", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 38 (3), 789-5.
- [16] Ghodgaonkar, D. K., Varadan V. V., Varadan V. K. 1990. "Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies" IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 39 (2), 387-7.
- [17] Goertzen W. K., Kessler M. R. 2006. "Dynamic Mechanical Analysis of Carbon/Epoxy Composites for Structural Pipeline Repair", Composites Part B, 38, 1-9.
- [18] Hanzl, P., Zetek, M., Baksa, T., Kroupa, T. 2015. "The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Slm Parts", in Procedia Engineering, Elsevier, 1405-8.
- [19] Hosseini, M., Hakkak, M. 2008. "Characteristics Estimation for Jerusalem Cross-Based Artificial Magnetic Conductors", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters., 7, 58-3.
- [20] Joo, B. D., Jang, J. H., Lee, J. H., Son, Y. M., Moon, Y. H. 2010. "Effect of Laser Parameters on Sintered Powder Morphology", Journal of Materials Science & Technology - Elsevier, 26(4), 375-3.
- [21] Karpov, A., Knyazev, S., Panchenko, B., Shabunin, S. 2014. "Design of Sandwich Type Radomes with Green's Function Method as a Radiation Problem Solving", in Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Hague, Netherlands, 3017-3.
- [22] Kartal, M., Güngör, İ., Döken, B. 2011. "A New Reflector Antenna Design Providing Two Different Patterns", in Proceedings of International Radio Scientific Conference(International Conference(URSI), İstanbul, Turkey, 1-4.
- [23] Kiani, G. I., Weily, A. R., Esselle, K. P. 2006. "Frequency Selective Surface Absorber Using Resistive Cross-Dipoles", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, NM, USA, 4199-3.
- [24] Kruth, J. P., Vandenbroucke, B., Vaerenbergh, J., Naert, I. 2005. "Rapid Manufacturing of Dental Prostheses by Means of Selective Laser Sintering/Melting", in

- Proceedings of 11th European Conference on Rapid Prototyping Edition, Paris, France, 4-9.
- [25] Kumar N. S., Shetty A., Ananth K., Shetty H. 2012. "Effect of Spindle Speed and Feed Rate on Surface Roughness of Carbon Steel in CNC Turning", in Proceedings of International Conference on Modeling, Optimization and Computing, Tamil Nadu, India, 691-6.
- [26] Langley, R. J., Parker, E. A. 1982. "Equivalent Circuit Model for Arrays of Square Loops", *Electronic Letters*, 18 (7), 294-2.
- [27] Langley, R. J., Parker, E. A. 1983. "Double-Square Frequencyselective Surfaces and Their Equivalent Circuit", *Electronics Letters*, 19 (17), 675-3.
- [28] Lee, C., Langley, R. 1985. "Equivalent-Circuit Models for Frequency-Selective Surfaces at Oblique Angles of Incidence", *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, 132 (6), 395-4.
- [29] Lin W. S, Lee B. Y. 2001. "Modelling the Surface Roughness and Cutting Forces During Turning", *Journal of Material Processing Technology*, 108, 286-7.
- [30] Luo, X. F., Teo, P. T., Qing, A., Lee, C. K. 2005. "Design of Doublesquare-Loop Frequency-Selective Surfaces Using Differential Evolution Strategy Coupled with Equivalent-Circuit Model," *Microwave and Optical Technology Letters*, 44 (2), 159-3.
- [31] Luo, G. O., Hong, W., Lai, Q. H. 2008. "Frequency-selective surfaces with Two Sharp Sidebands Realised by Cascading and Shunting Substrate Integrated Waveguide Cavities," *IET IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2, 23-4.
- [32] Ma, D., Zhang, W. S. 2007. "Mechanically Tunable Frequency Selective Surface With Square-loop-slot Elements", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 21 (15), 2267-9.
- [33] Majumdar, P., Zhao, Z., Liu, R. 2014. "Parametric Analysis of Different Configurations of Loop Elements in Frequency-Selective Surfaces", *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 4 (2), 161-7.
- [34] Marouani, S., Curtil, L., Hamelin, P. 2008. "Composites Realized by Hand Lay-up Process in a Civil Engineering Environment: Initial Properties and Durability", *Materials and Structures*, 41, 831-20.
- [35] Mudar, A. J., Behdad, N. 2009. "A New Technique for Design of Low-profile, Second-Order, Bandpass Frequency Selective Surfaces", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 57, 452-7.
- [36] Munk, B. A. 2000. "Frequency Selective Surface: Theory and Design", NewYork, NY, USA: Wiley.
- [37] Nisanci, M. H., Tesneli, A. Y., Tesneli N. B., Tek, E. 2016. "Parameter Analysis of a Novel Single Layer 3D Band-Pass FSS Designed by Combination of Continuous and

- Discontinuous Conductive Rods”, in Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Shanghai, China, 3329-4.
- [38] Ozel, K., Sahin, M., Akdogan, A. 2008. “Mechanical and Metallurgical Properties of Aluminium and Copper Sheets Joined by Cold Pressure Welding”, *Journal of Mechanical Engineering*, 11, 796-12.
- [39] Prohaszka, J., Mamalis, A. G., Vaxevanidis, N. M. 1996. “The Effects of Electrode Material on Machinability in Wire Electro-Discharge Machining”, *Journal of Materials Processing Technology*, 69, 233-4.
- [40] Rebelo, J. C., Dias, A. M., Mesquita, R., Vassalo, P., Santos, M. 2000. “An Experimental Study on Electro- Discharge Machining and Polishing of High Strength Copper-Beryllium Alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 103, 389-8.
- [41] Romeu, J., Rahmat-Samii, Y. 1999. “Dual band FSS with fractal elements”, *Electronics Letters*, 35(9), 702-2.
- [42] Rozenek, M., Kozak, J., Dobrowwki, L., Lubkowwki, K. 2001. “Electrical Discharge Machining Characteristic of Metal Matrix Composites”, *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 367-3.
- [43] Sarabandi, K., Behdad, N. 2007. “A frequency selective surface with miniaturized elements,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 55, 1239-6.
- [44] Schnitzer, M., Lisy, M., Hudak, R., Zivcak, J. 2015. “Experimental Measuring of the Roughness of Test Samples Made Using DMLS Technology from the Titanium Alloy Ti-6Al-4V”, in Proceedings of 13th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Herlany, Slovakia, 22-2.
- [45] Singh, D., Kumar, A., Meena, S., Agarwala, V. 2012. “Analysis of Frequency Selective Surfaces for Radar Absorbing Materials”, *Progress In Electromagnetics Research B (PIER-B)*, 38, 297-7.
- [46] Sung, G. H., Sowerby, K. W., Williamson, A. G. 2005. “Equivalent Circuit Modelling of a Frequency Selective Plasterboard Wall”, in Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington, DC, USA, 400-3.
- [47] Tamijani, A. A., Sarabandi, K., Rebeiz, G. M. 2004. “Antenna-filter-antenna Arrays as a Class of Bandpass Frequency Selective Surfaces”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 52, 1781-8.
- [48] Uchida, T., Hamada, H., Kuroda, K., Endo, A., Migaki, M., Ochiai, J., Uozumi, T., Goto, A. 2015. “Process Analysis of the Hand Lay-Up Method Using CFRP Prepreg Sheets”, in Proceedings of International Conference on Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management, Vancouver, BC, Canada, 227-10.

- [49] Valera H. Y., Bhavsar S. N. 2014. "Experimental Investigation of Surface Roughness and Power Consumption in Turning Operation of EN 31 Alloy Steel", in Proceedings of 2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, Gujarat, India, 528-6.
- [50] Wu, T. K. 1995. "Frequency Selective Surfaces and Grid Array", New York, NY, USA: Wiley.
- [51] Wu, G., Hansen, V. 2003. "A Novel Procedure for Designing Band-Pass Filters Using FSS Structures", in Proceedings of International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT), Tucson, Arizona, 283-7.
- [52] Yao, X., Bai, M., Miao, J. 2011. "Equivalent Circuit Method for Analyzing Frequency Selective Surface With Ring Patch in Oblique Angles of Incidence", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 10, 820-3.
- [53] Zhang, J. C., Yin, Y. Z., Ma, J. P. 2009. "Frequency Selective Surfaces with Fractal Four Legged Elements", Progress in Electromagnetics Research L (PIER-L), 8, 1-8.
- [54] Zhang, T., Yang, G., Li, W., Jiang, Q., Wu, Q. 2010. "Research on Novel Miniaturized Frequency Selective Surfaces Consist of Rectangle Spiral-Based Elements", in Proceedings of Global Mobile Congress, Shanghai, China, 1-4.
- [55] Zhao, P.C., Zong, Z.Y., Wu, W., Fang, D.G. 2016. "A Convoluted Structure for Miniaturized Frequency Selective Surface and Its Equivalent Circuit for Optimization Design," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 64 (7), 2963-7.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Yrd. Doç. Dr. MUHAMMET HİLMİ NİŞANCI
Proje No:	115E285
Proje Başlığı:	X Bandı Radar Antenleri İçin 3 Boyutlu Eklemeli İmalat Yöntemi İle Kompozit Frekans Seçici Yüzey Kaplama Malzemesi Üretimi
Proje Türü:	3501 - Kariyer
Proje Süresi:	30
Araştırmacılar:	ŞUAYB ÇAĞRI YENER
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	SAKARYA Ü. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2015 - 01/04/2018
Onaylanan Bütçe:	236577.0
Harcanan Bütçe:	142119.88
Öz:	<p>Bu projede, X bandı radar antenleri için dairesel kesitli silindirik metal veya karbon fiber takviyeli üç boyutlu (3D) kompozit frekans seçici yüzey (FSY) kaplama malzemelerinin geliştirilmesi, karakterizasyonu ve bu malzemelerin üretimi konularında çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda, normal şartlar altında dielektrik özellikleri sebebiyle elektromanyetik (EM) dalgalara geçirgen olan epoksi tutucu malzeme içine ilk olarak süreksiz metal fiber takviye malzemeleri konumlandırılarak FSY'nin çalışma frekansında bant durduran filtre karakteristiği göstermesi sağlanmıştır. Daha sonra sonlu uzunluktaki süreksiz takviye malzemeleri arasında sürekli takviyelerin ilave edilmesi ile çalışma frekansında bant geçiren filtre karakteristiğine sahip özgün FSY yapısı tasarlanmıştır. Ayrıca, farklı çap ve uzunlukta fiberler beraber kullanılarak metal fiber takviyeli FSY'ler için çok-bantlı filtre karakteristiği elde edilmiştir. Projenin ikinci aşamasında metal takviye malzemeleri yerine sağladıkları üstün mekanik ve elektriksel özelliklerinden dolayı günümüzde kullanımları yaygınlaşan karbon takviye malzemelerinin FSY tasarımında kullanılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda hem karbon hem de metal fiber takviyeli bant durduran FSY tasarımları gerçekleştirilerek takviye malzeme türünün frekans cevabına etkileri de incelenmiştir. Ayrıca karbon takviyeli FSY'nin üretimlerinde kullanılan sertleştiricinin oranı azaltılarak eğimli radom yüzey uygulamaları için esnek ve bükülebilir kaplama malzemesi üretilmiştir. Proje kapsamında takviye malzemelerinin tutucu malzeme içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile FSY'lerin fiberler doğrultusunda yüksek mukavemet sağlamaları hedeflenmiştir. Projenin üçüncü ve son aşamasında polarizasyon bağımsız metal tripod takviyeli FSY tasarımları sunulmuştur. Çalışmada tasarlanan tüm FSY'lerin prototip üretimleri yapılmış olup serbest uzay test metodu kullanılarak elde edilen frekansa bağlı iletim parametreleri ile bilgisayar tabanlı benzetim sonuçları doğrulanmıştır. Yapılan elektriksel çalışmalara ek olarak, üretimlerde kullanılan takviye malzemelerinin mekanik testleri de gerçekleştirilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Kompozit frekans seçici yüzeyler, fiber takviyeli yapılar, radom, bilgisayar tabanlı benzetim
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Experimental Validation of a 3D FSS Designed by Periodic Conductive Fibers Part-2: Band-Stop Filter Characteristic (Makale - İndeksli Makale), 2- Experimental Validation of a 3D FSS Designed by Periodic Conductive Fibers Part-1: Band-Pass Filter Characteristic (Makale - İndeksli Makale), 3- Investigation of an Optimal Distance Between the Microstrip Patch Antenna and the Surrounding Electromagnetic Bandgap Structure (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 4- Parameter Analysis of a Novel Single Layer 3D Band-pass FSS Designed by Combination of continuous and Discontinuous Conductive Rods (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),