

Araştırma Makalesi – Research Article

Farklı Element Katkılı Sodyum Fosfat Camlarının Sentez ve Karakterizasyonu

Synthesis and Characterization of Sodium Phosphate Glasses Doped with Different Elements

Serhat Keser^{1*}, Cengiz Tatar², Tankut Ateş³, Turan İnce⁴, Ömer Kaygılı⁵

Geliş / Received: 26/02/2021

Revize / Revised: 30/04/2021

Kabul / Accepted: 09/06/2021

ÖZET

Bu çalışmada, yaş kimyasal yöntemi ile üretilen Ba ve Li katkılı sodyum fosfat (NaPO_3) camları karakterize edildi. Ba katkılı numunelerin tamamının ve en yüksek Li katkısına sahip numunenin amorf yapıya sahip olduğu görüldü. Bunların haricindeki tüm numunelerin kristal yapıya sahip olduğu gözlemlendi. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi sonuçları NaPO_3 yapısının oluşumunu desteklemektedir. Morfoloji, katkıların türü ve bunların miktarından etkilendi.

Anahtar Kelimeler- *X-Işını Kırınımı (XRD), Morfoloji, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR)*

ABSTRACT

In this study, Ba- and Li-doped sodium phosphate (NaPO_3) glasses synthesized by the wet chemical method were characterized. It was seen that all of the Ba-doped samples and the sample with the highest Li-doped had the amorphous structure. It was observed that all the samples except these had the crystal structure. Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy results support the formation of the NaPO_3 structure. The morphology was affected by the kind of dopants and their amounts.

Keywords- *X-Ray Diffraction (XRD), Morphology, Fourier Transform Infrared (FTIR)*

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: serhatkeser@gmail.com (ORCID: 0000-0002-9678-1053)

Kimya Teknolojisi Bölümü, EOSB MYO, Fırat Üniversitesi 23119 Elazığ

²İletişim: ctatar@firat.edu.tr (ORCID: 0000-0002-0876-9071)

Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi 23119 Elazığ

³İletişim: tankut_ates@hotmail.com (ORCID: 0000-0002-4519-2953)

Mühendislik Temel Bilimleri Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi 44000 Malatya

⁴İletişim: trince23@gmail.com (ORCID: 0000-0001-7885-1882)

Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi 23119 Elazığ

⁵İletişim: okaygili@firat.edu.tr (ORCID: 0000-0002-2321-1455)

Fizik Bölümü, Fen Fakültesi, Fırat Üniversitesi 23119 Elazığ

I. GİRİŞ

İnorganik malzemelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakılmasıyla üretilen seramik çeşitlerine “cam” adı verilir. Her ne kadar seramik türü olsalar da camlar, bazı fiziksel ve kimyasal özellikler bakımından seramiklerden farklılıklara sahiptirler. Örneğin, seramikler kristal yapıdadırlar ve sentez sırasında eriyene kadar ısıtılıp, sertleşinceye kadar soğutulurlar. Buna karşılık camlar, kristal yapıya sahip değildir ve belirli bir düzene sahip olmayan inorganik yapıdadırlar. Kristal yapıya sahip moleküller düzenli bir yapıdayken, camın içerdiği moleküller katı oldukları halde rastgele yapıya sahiptirler. Camlar metalik, oksit ve oksit olmayan camlar şeklinde 3 ana gruba ayrılarak incelenirler. Fosfat camları, oksit cam grubunda yer alırlar. Elektriksel iletkenliklerinin ve ultraviyole geçirgenliklerinin yüksek olması, düşük sıcaklıklarda çalışabilmeleri gibi fiziksel özellikleri fosfat camlarının diğer tür camlara nazaran daha çok tercih edilmelerine neden olmaktadır. Cam malzemeler, hem günlük hayatta hem de teknolojiye kullanım alanı bulan vazgeçilmez malzemeler olarak kabul edilmektedirler [1].

Üç grupta incelenen camlar tek bileşene, iki bileşene ve ikiden daha fazla bileşene sahip olabilirler. Cam çeşitlerinin en önemlileri ise fosfat camları, soda-kireç silikat, boro-silikat, kurşun-silikat ve alümina-silikatlar olarak kabul edilmektedir [2, 3].

Fosfat camlarının yapısında alümina yüksek, alkali düşük oranlarda olduğunda bu camların yapısı silikat camlarına benzer. Silisyum (Si) iyonları 4 değerlikli iken, fosfor (P) iyonları ise 5 değerliklidir ve bu iyonların büyüklükleri birbirine benzer. Bu tür yapılarda P^{+5} iyonunun sahip olduğu fazla yükler, 3 değerlikli alüminyum (Al), 2 değerlikli kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) gibi iyonlar sayesinde nötralize edilirler. Saf haldeki katkısız fosfat camları, P^{+5} iyonu yapıya oksijen (O) atomlarının girmesini sağladığı için yapı olarak zayıftırlar ve erime noktaları düşüktür. Ancak bu camların erime noktaları farklı katkılarla yükseltilebilir [2, 3].

Günümüzde fosfat camları uygun fiziksel ve kimyasal özellikleri sayesinde teknolojiye önemli kullanım alanları bulmaya başlamıştır. Silikat camları ve/veya borat camları ile kıyaslandığında genleşme katsayılarının yüksekliği, yumuşama ve üretim sıcaklıklarının düşüklüğü gibi nispeten avantajlı ve önemli özellikler taşımaktadırlar [4]. Fosfat camları lazer camı olarak, hızlı şarj özelliğine sahip batarya malzemesi olarak, güneş pili olarak, biyomalzeme olarak ve nükleer atıkların taşınmasında potansiyel kullanım alanına sahiptirler [4-6].

Fosfat camları, oksit camları içinde yer alırlar ve şeffaflıklarının yüksek olması, erime noktalarının ve viskozitelerinin düşüklüğü, ultraviyole (veya morötesi, UV) iletimlerinin yüksekliği gibi önemli fiziksel özellikleri ile öne çıkmaktadırlar [7]. Bu tür özellikler fosfat camlarını fotonik uygulamalarda tercih edilebilir hale getirmektedir. Bu tip uygulamalar için nadir toprak elementleri ile katılan fosfat camları üretilmekte ve kullanılmaktadır. Örneğin neodimyum (Nd^{+3}) katılan fosfat camları günümüzde üretilen en büyük lazer camı olarak bilinmektedir [8]. Ayrıca fosfat camlarının mekanik özelliklerinin mükemmel yakın olması, optik berraklıklarının ve biyo uyumluluklarının yüksek olması nedeniyle hem optik alanında hem de biyomedikal alanında kullanılmaktadırlar [9].

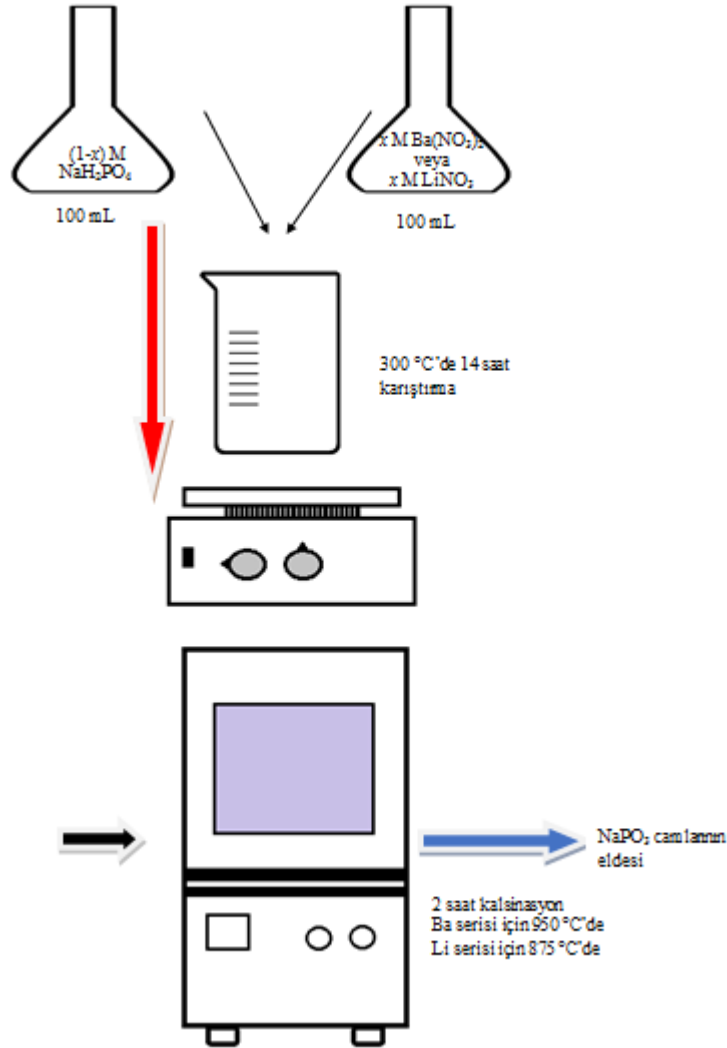
Bütün avantajlarının yanında fosfat camlarının bazı dezavantajları da vardır. Örneğin kimyasal kararlılıklarının zayıf olması, korozyona karşı dayanıksız olmaları endüstriyel uygulamaları kısıtlamaktadır. Fosfat camlarının yapısına üretim aşamasında geçiş metallere oksitleri katıldığı zaman kimyasal kararlılıklarının arttığı bilinmektedir. Bu katkılar sırasında fosfat camlarının yapısında P-O-P bağlarının yerini M-O-P bağları olarak yapısal değişiklikler meydana gelmektedir [4, 8]. Fosfat camlarıyla alakalı literatür incelendiğinde; Reis vd. [10] Al^{+3} ve Fe^{+3} gibi yüksek değerliğe sahip metallere, Sirtokin vd. [11] sülfat (SO_4^{2-}) iyonlarının, Iturraran vd. [6] ise kalay bileşiklerinin fosfat camlarının yapısına katılmasıyla kimyasal kararlılıklarının artırılabilirliğini belirtmişlerdir. Keser vd. [12] Cu katılan, Ateş vd. [13] ise Ag katılan fosfat camlarının yapılarındaki değişimleri incelemiş ve bu metallere fosfat camlarının yapısında önemli değişikliklere neden olduklarını belirlemişlerdir.

Bu çalışmada Ba ve Li katılı iki farklı seri olarak hazırlanan $NaPO_3$ camlarının üretimi ve üretilen bu cam örneklerinin XRD, SEM, EDX ve FTIR metotlarıyla karakterizasyonu gerçekleştirildi.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

A. Sentez

Bu çalışmada kullanılan numuneler yaş kimyasal yöntemi ile hazırlandı. Şekil 1'de verilen akış diyagramında özetlenen sentez üç aşamadan (çözeltilerin hazırlanması, kurutulması ve ısıl işleme tabi tutulmaları) oluşmaktadır: Sodyum fosfat camlarının üretilmesinde kullanılan başlangıç kimyasalları sodyum fosfat monobazikdihidrat (NaH_2PO_4 , Sigma-Aldrich), lityum nitrat (LiNO_3 , Merck) ve baryum nitrattan ($\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, Merck) oluşmaktadır. İki farklı balon jojenin birinde $(1-x)$ M NaH_2PO_4 ve x M $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ çözeltileri hazırlandı. Li katkılı numuneler için x M LiNO_3 kullanıldı. Burada bahsi geçen x değerleri hem Ba hem de Li katkılı numuneler için aynı olup, sırasıyla 0, 0.01, 0.02 ve 0.03'tür. Her iki çözelti için de çözücü olarak saf su kullanıldı. Bu çözeltiler bir beher içerisine boşaltılarak, bir manyetik karıştırıcı vasıtasıyla 300°C sıcaklıkta 14 saat boyunca karıştırıldılar. Bu sürecin akabinde toz haline getirilen numuneler bir kül fırını içerisine yerleştirildi. Ba katkılı numuneler 950°C 'de 2 saat boyunca ısıl işleme tabi tutuldu. Li katkılı numuneler 875°C 'de 2 saat boyunca ısıl işleme tabi tutuldu. Isıl işlemler sonrası her bir seri için birer adet katkısız, üç adet Ba ve yine üç adet Li katkılı NaPO_3 numuneleri üretildi. Ba katkılı numuneler, sırasıyla B1, B2, B3 ve B4 olarak isimlendirildi. Benzer biçimde, Li katkılı numuneler L1, L2, L3 ve L4 olarak adlandırıldı.



Şekil 1. Li ve Ba katkılı iki farklı seri halinde NaPO_3 camlarının üretim safhaları

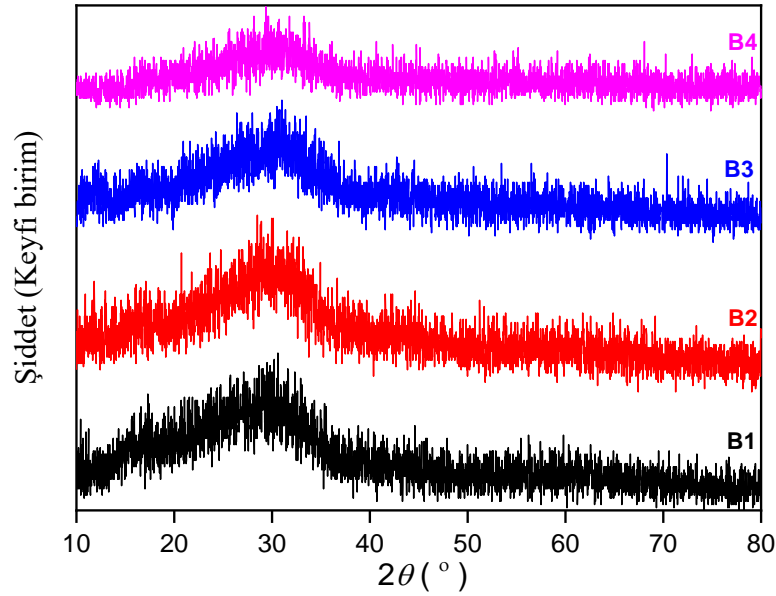
B. Karakterizasyon

Üretilen numunelerin kristal yapı incelemeleri, Bruker D8 Advance cihazı kullanılarak X-ışını kırınımı (XRD) desenlerinin kaydedilmesi suretiyle gerçekleştirildi. Numuneler içerisindeki fonksiyonel grupların belirlenmesi, Perkin Elmer Spectrum One model spektrofotometre vasıtasıyla Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumlarının kaydedilmesi ile tamamlandı. Son olarak, JEOL JSM 7001F taramalı elektron mikroskobu kullanılmak suretiyle alınan SEM görüntülemeleri sayesinde morfolojik incelemeler yapıldı.

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

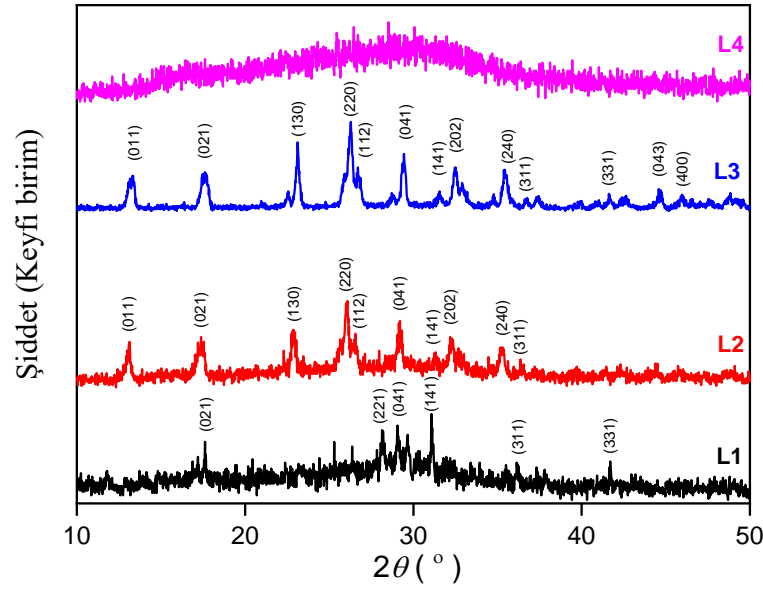
A. X-ışını Kırınımı Sonuçları

Şekil 2’de verilen X-ışını kırınımı analizi sonuçlarından da açıkça görüldüğü üzere, üretilen hem katkısız numunenin hem de Ba-katkılı numunelerin hiçbirinde kristal yapıya işaret eden herhangi bir pike rastlanmamaktadır. Dört XRD deseninde de 10° ile 40° arasında belirgin bir yayvan pik mevcuttur ki bu durum hem katkısız hem de Ba katkılı numunelerin amorf yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Önceki çalışmalarımızda farklı elementler katkılanarak kristal yapıya sahip katkılı ve katkısız sodyum fosfat numunelerini de göz önüne alarak, şunu söyleyebiliriz: Gerek katkılı gerekse katkısız halde üretilen sodyum fosfat camlarının kristalleşmesi, katkılanan elementin türü ve miktarından etkilenmesinin yanı sıra uygulanan ısı işlemde kullanılan sıcaklıktan da etkilenmektedir [12, 13].



Şekil 2. Katkısız ve Ba-katkılı NaPO_3 camlarının XRD desenleri

Li katkılı sodyum fosfat camlarına ait XRD desenleri Şekil 3’te gösterilmiştir. Gözlemlenen tek faz ortorombik kristal yapıdaki sodyum fosfat (NaPO_3 , JCPDS PDF No: 11-0648) fazıdır. Katkısız numunenin (L1), düşük kristalleşmeye sahip olduğu gözlemlenen piklerin sayısına ve şiddetine bakıldığında görülebilmektedir. Katkısız numuneye nazaran, Li katkılı L2 ve L3 numunelerinin kristalleşmesi yüksektir. Fakat en yüksek Li katkısına sahip olan L4 numunesi için aynı durum söz konusu olmayıp, numunede gözlemlenen yayvan piktan da belli olacağı üzere amorf yapıya sahiptir. Aynı sentez şartları kullanılmasına rağmen, Li katkısının NaPO_3 camlarının kristal yapısı üzerine etkisi oldukça fazladır. Yine Şekil 3’teki XRD desenlerine bakıldığında, Li katkısının bazı kristal düzlemlerinin belirgin olmasını sağlayacak biçimde açığa çıkmasına neden olduğu da görülebilir.



Şekil 3. Katkısız ve Li katkılı sodyum fosfat camlarının XRD desenleri

Şekil 2 ve Şekil 3'te verilen XRD desenleri arasında bariz farklılıklar vardır. Ba katkılı seride, referans numune de dahil olmak üzere tüm numuneler amorf yapı sergilemektedir. Fakat Li katkılı seride yalnızca en fazla Li katkısına haiz olan numune amorf yapı sergilerken, referans numune de dahil olmak üzere serinin geri kalan kısmının kristal yapı sergiledikleri tespit edilmiştir. Özellikle referans numunenin bir seride amorf diğer bir seri de kristal yapıya sahip oluşu anormal bir sonuç değildir. Bilindiği üzere camlar, amorf yapıya sahiptirler. Bununla birlikte, bazı camların uygun sıcaklık ve sürede kontrollü olarak kristalleşme özelliği de mevcuttur [14]. İki serinin üretimi aynı ısı işlem süresinde yapılmış olmasına rağmen, ısı işlem sıcaklıkları farklıdır. Bu da NaPO_3 camlarının kristalleşmesinin her sıcaklıkta ve her katkı için gerçekleşmeyeceğinin göstergesi kabul edilebilir.

Ortorombik kristal yapıya ait örgü parametreleri (a , b ve c) ve birim hücre hacmi (V) değerlerinin hesaplanmasında aşağıda verilen bağıntılar kullanıldı [12].

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (1)$$

$$V = abc \quad (2)$$

Yukarıda verilen bağıntılarda geçen h , k ve l terimleri Miller indisleri olarak bilinir ve d ise komşu iki düzlem arasındaki mesafeye karşılık gelmektedir. Bu denklemler yardımıyla hesaplanan a , b , c ve V değerleri Tablo 1'e kaydedilmiştir. İlgili tabloya bakıldığında L4 numunesi amorf yapıya sahip olduğu için doğal olarak bu dört parametrenin herhangi bir hesaplanmış değerine rastlanılamaz. İlgili tablodaki rapor edilen sonuçlara bakılacak olunursa; tüm örgü parametrelerinde Li katkısı ile birlikte sürekli bir düşüş meydana gelmektedir ve bunun neticesinde birim hücre hacminde de azalma tespit edilmektedir. Bu durum, Na^+ ve Li^+ iyonlarının iyonik yarıçapları ile ilişkilendirilebilir. Na^+ için bu değer 0.102 nm iken, Li^+ için 0.076 nm'dir. Daha küçük iyonik yarıçapa sahip Li^+ iyonlarının, mevcut Na^+ iyonlarının yerini alması durumunda kristal örgüde bir küçülmenin olması gayet normal bir durum teşkil eder. Ayrıca hesaplanan bu parametrelerdeki değişimler, Li^+ iyonlarının NaPO_3 yapı içerisine nüfuz ettiğinin bir göstergesi olarak kabul edilebilir.

Kristal büyüklüğü (D) değeri, iyi bilinen Scherrer denklemi vasıtasıyla hesaplandı [12].

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3)$$

Denklemden verilen λ X-ışınlarının dalga boyu, β yarı maksimumdaki tam pik genişliği ve θ Bragg açısına karşılık gelmektedir. Kristal büyüklüğü değeri, L1, L2 ve L3 numuneleri için sırasıyla 20.86 nm, 15.25 nm ve 22.24 nm olarak hesaplanmıştır.

Kristalleşme yüzdesi ($X_c\%$) hesabı aşağıdaki bağıntı kullanılmak suretiyle gerçekleştirildi [12]:

$$X_c \% = \frac{\sum A_c}{\sum A_c + \sum A_a} \times 100 \quad (4)$$

Burada $\sum A_c$ ve $\sum A_a$ terimleri sırasıyla, kristal ve amorf yapıları temsil eden pikler altında kalan toplam alanlara karşılık gelmektedir. Tablo 1'deki değerlere bakılacak olunursa; numunelerin hesaplanan kristalleşme yüzdeleri L1, L2 ve L3 için sırasıyla % 16.40, % 47.76 ve % 75.89 şeklindedir. L4 numunesinde kristalleşme mevcut değildir, yapı amorf halde kalmıştır.

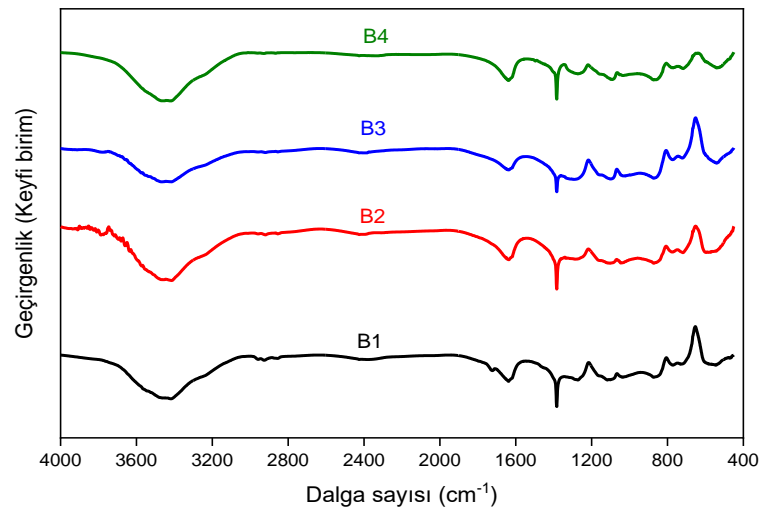
Tablo 1. Katkısız ve Li katkılı sodyum fosfat camlarına ait kristal yapı parametrelerinin hesaplanan değerleri

Numune	a (nm)	b (nm)	c (nm)	V (nm ³)	D (nm)	X _c (%)
L1	0,7947	1,3439	0,7867	0,8402	20,86	16,40
L2	0,7928	1,3333	0,7808	0,8253	15,25	47,76
L3	0,7891	1,3202	0,7696	0,8018	22,24	75,89
L4	-	-	-	-	-	-

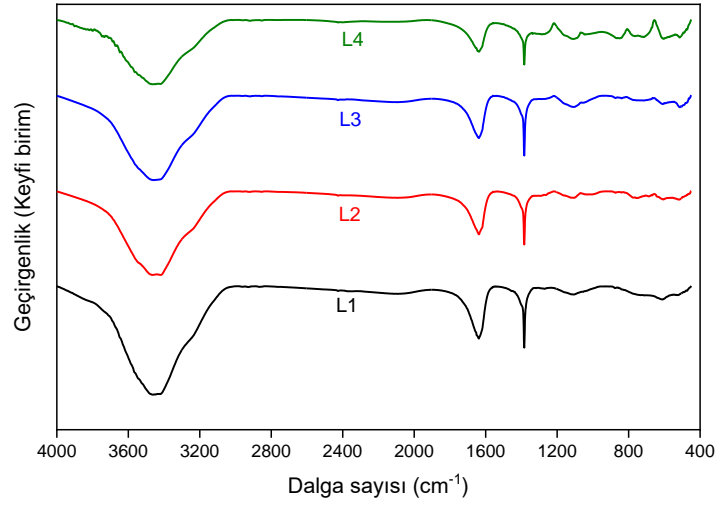
Tıpkı Li katkılı seriye ait L4 numunesinde olduğu gibi Ba katkılı serinin tüm numuneleri de amorf yapıya haiz olduğundan, bu numuneler için de a, b, c, V, D ve X_c% parametrelerinin hesaplanması söz konusu değildir.

B. FTIR Sonuçları

Şekil 4 ve Şekil 5'te verilen Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrumlarında fosfat grubunun ve adsorbe olmuş suyun titreşim modlarına ait bantlara rastlanmaktadır. Bunlardan fosfat grubuna karşılık gelen bantlar Ba katkılı seri için sırasıyla 533 cm⁻¹, 877 cm⁻¹, 1103 cm⁻¹ ve 1384 cm⁻¹'de tespit edilmiştir [15-18]. Li katkılı seri için fosfat grubuna ait bantlar 520 cm⁻¹, 1117 cm⁻¹ ve 1384 cm⁻¹'de gözlemlenmiştir. Ba katkılı seri için 1637 cm⁻¹'de tespit edilen bant ve 3453 cm⁻¹'de gözlemlenen daha geniş bant, adsorbe olan suyun titreşim modlarına karşılık gelmektedir [19]. Li katkılı seri için bahsi geçen bantlar 1646 cm⁻¹ ve 3461 cm⁻¹'de tespit edilmiştir.



Şekil 4. Elde edilen her bir sodyum fosfat camına ait FTIR sonucu

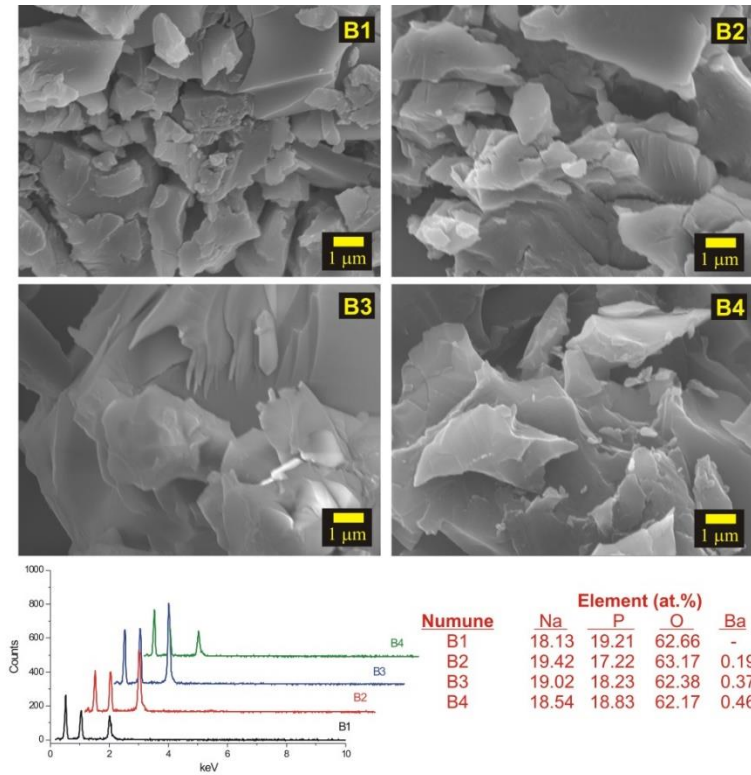


Şekil 5. Katkısız ve Li katkılı sodyum fosfat camlarının FTIR sonuçları

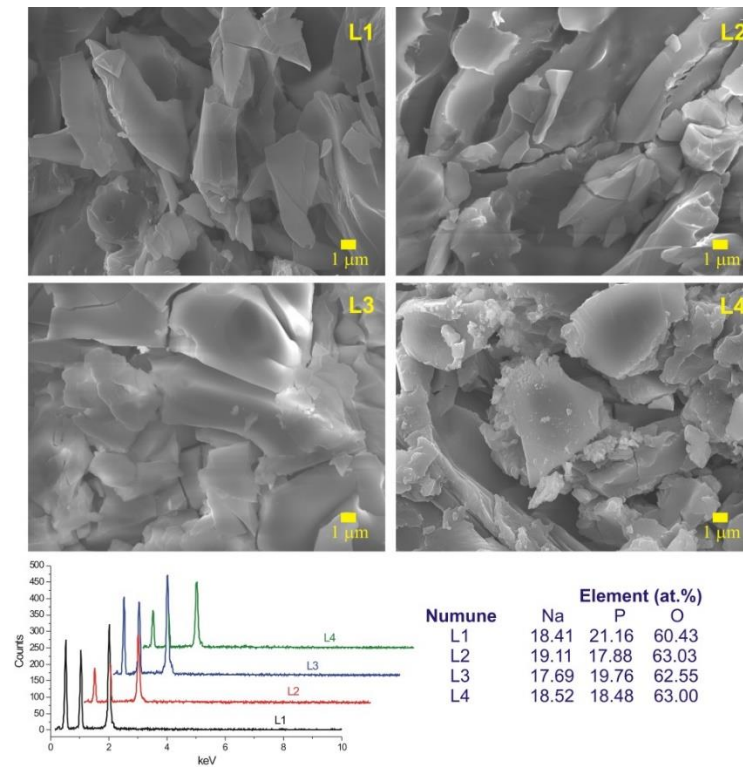
C. Morfolojik Analizler

Şekil 6’da verilen, numunelere ait SEM görüntülerinin ve bu görüntü alınan bölgelerin elementel analizini veren EDX raporuna bakılacak olunursa şunları söylemek mümkündür. Morfolojik anlamda, Ba katkılanmış ve katkılanmamış numuneler arasında göze çarpan ciddi bir farklılık bulunmamaktadır. Görüntü alınan bölgelere ait EDX raporları da numuneler içerisinde beklendiği gibi katkısız numunede Na, P ve O ve katkılı numunelerde ise Na, P, O ve Ba elementlerinin tespit edildiğini göstermektedir. Bunların dışında fazladan bir elementin mevcut olmadığı da tespit edilmiştir. Dört numune için de Na ve P’nin atomik yüzdesinin birbirine yakın olduğu bulunmuştur. Ba elementinin atomik yüzdesinin katkılamayla orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir.

Katkısız ve Li katkılı olarak üretilen sodyum fosfat camlarına ait SEM görüntüleri ve EDX analiz raporu Şekil 7’de verilmiştir. Li katkısının morfolojik anlamda çok ciddi bir değişim meydana getirdiği söylenememekle birlikte, özellikle L3 ve L4 numunelerinde nano-boyuttaki parçacıklara, yüzeyler üzerinde ve boşluk ve/veya çatlaklar arasında rastlamak mümkündür. EDX analiz sonuçları, numunelerde Na, P ve O elementlerinin bulunduğu ve kirlilik olarak kabul edilebilecek fazladan bir elementin tespit edilmediğine işaret etmektedir. EDX analizörü tarafından Li elementinin tespiti mümkün olmadığından, Li miktarının elementel bileşime ne doğrultuda bir etki yaptığı hakkında bir şey söylenmesi mümkün değildir. Ayrıca, EDX sonuçlarında gözlemlenen elementlerin atomik bileşimlerine bakıldığında, sonuçların her bir numune için NaPO_3 yapısının oluşumunu destekler nitelikte olduğu söylenebilir.



Şekil 6. Ba katkılı numunelere ait SEM fotoğrafları ve görüntü alınan bölgelere ait EDX analiz raporu



Şekil 7. Li katkılı numunelere ait SEM görüntüleri ve EDX analiz raporu

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, katkısız ve 0.01, 0.02 ve 0.03 M Ba ve yine aynı oranlara Li katkılanmış sodyum fosfat camlarının üretimi yaş kimyasal yöntem vasıtasıyla yapılmış, daha sonra bu camların FTIR, XRD, SEM ve EDX teknikleri ile karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.

Ba katkılı seri için şu sonuçlara varılmıştır: Üretilen bütün numunelerin amorf yapıda olduğu belirlenmiştir. FTIR sonuçları sentez sonucunda sodyum fosfat camları oluştuğunu göstermiştir. Sentezlenen örneklerin SEM incelemelerinde, Ba katkısının ve bu katkılamanın miktarının morfoloji üzerinde etkiye sahip olduğunu gözlenmiştir. Son olarak EDX sonuçlarına bakıldığında, üretilen numunelerin sentez öncesinde hesaplanan teorik elementel bileşime yakın olduklarını ve Ba elementinin fosfat camlarının yapısına katıldığını görülmektedir.

Li katkılı numuneler içinse şu sonuçlara ulaşmak mümkündür: Li katkısının kristalleşme miktarı, örgü parametreleri ve kristal büyüklüğü üzerinde etkileri olduğu belirlenmiştir. L1 numunesinin düşük kristalleşmeye, L2 ve L3 numunelerinin ise yüksek kristalleşmeye sahip olduğu, L4 numunesinin ise amorf yapıda olduğu anlaşılmıştır. FTIR analizleri incelendiğinde elde edilen sonuçların sodyum fosfat camlarının oluşumunu desteklediği gözlenmiştir. Üretilen numunelerin morfolojik değerlendirmelerinde, Li katkılamanın morfoloji üzerinde etkili sonuçlara sebep olduğunu belirlenmiştir. Elementel analiz sonuçları, elde edilen ürünlerin sentez öncesinde hesaplanan elementel bileşime sahip olduklarını ve Li elementinin fosfat camlarının yapısına nüfuz ettiğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Çetinkaya Çolak, S. (2009). Geçiş metal iyonları katkılı sodyum-fosfat camların elektrik, optik, yapısal, yüzeysel ve termal özellikleri. Doktora Tezi, Fizik Bölümü, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- [2] Orbay, B. (2007). Potasyum mikası ve kordierit içeren işlenebilir cam seramiklere çekirdeklenme katalisti (TiO₂) ilavesinin kristalizasyon davranışı ve elektriksel özellikler üzerindeki etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [3] Çekli, C. (2005). Sodyum-potasyum mikası ve florapatit içeren işlenebilir cam seramiklerin kristalizasyon davranışları, işlenebilirlik özellikleri ve biyoaktivite karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [4] Choudhary, B. P. & Singh N. B. (2016). Properties of silver phosphate glass in the presence of nanosize cobalt and nickel oxides. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 440, 59–69.
- [5] Liang, X., Li, H., Wang, C., Yu, H., Li, Z. & Yang, S. (2014). Physical and structural properties of calcium iron phosphate glass doped with rare earth. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 402, 135–140.
- [6] Iturraran, N., Huriaux, K., Bao, Y., Gawne, D. T. & Guilment, J. (2018). Effect of melting parameters during synthesis on the structure and properties of tin fluoride phosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 489, 64–70.
- [7] Chanthima, N., Tariwong, Y., Djamal, M., Kaewkhao, J. & Sangwanatee, N. (2018). Physical, optical and luminescence properties of Sm³⁺ doped lithium aluminium phosphate glass system. *Materials Today: Proceedings*, 5, 15066–15071.
- [8] Novais, A.L.F., Dantas, N.O., Guedes, I. & Vermelho, M.V.D. (2015). Spectroscopic properties of highly Nd-doped lead phosphate glass. *Journal of Alloys and Compounds*, 648, 338–345.
- [9] Kim, K., Rahimi, S. K., Alam, T. M., Sorte, E. G. & Otaigbe, J. U. (2018). Unexpected effects of inorganic phosphate glass on crystallization and thermo-rheological behavior of polyethylene terephthalate. *Polymer*, 154, 135–147.
- [10] Reis, S.T., Karabulut, M. & Day, D. E. (2001). Chemical durability and structure of zinc-iron phosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 292, 150–157.
- [11] Sirotkin, S., Meszaros, R. & Wondraczek, L. (2012). Chemical stability of ZnO–Na₂O–SO₃–P₂O₅ glasses. *International Journal of Applied Glass Science*, 3, 44–52.
- [12] Keser, S., Ateş, T. & Kaygılı, O. (2019). Cu katkılı NaPO₃ camlarının sentez ve karakterizasyonu. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 552–561.
- [13] Ateş, T., Keser, S. & Kaygılı, O. (2019). Ag katkılı NaPO₃ camları: Sentez ve karakterizasyon. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 428–434.

- [14] Kaygılı, Ö. (2005). Radyasyonun cam-seramik maddelerin kristalleşme ve mekanik özellikleri üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [15] Jha, P. K., Pandey, O. P. & Singh, K. (2016). Non-isothermal crystallization kinetics of K₂O modified sodium-phosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 440, 76-84.
- [16] Basak, A., Ramrakhiani, L., Ghosh, S., Sen, R. & Mandal, A. K. (2018). Preparation of chromium doped phosphate glass adopting microwave irradiation and comparative analysis of properties with conventional glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 500, 11-17.
- [17] Stefanovsky, S. V., Stefanovsky, O. I., Kadyko, M. I. & Nikonov, B. S. (2018). Sodium aluminum-iron phosphate glass-ceramics for immobilization of lanthanide oxide wastes from pyrochemical reprocessing of spent nuclear fuel. *Journal of Nuclear Materials*. 500, 153-165.
- [18] Liu, J., Zhu, Y., Wang, F., Liao, Q., Zhu, H., Deng, Y. & Zhu, Y. (2018). Properties and structural features of iron sodium phosphate glasses containing neodymium oxide. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 500, 92-97.
- [19] Abdelghanyi, A. M., El-Damrawi, G., Oraby, A. H. & Madshal, M. A. (2018). Optical and FTIR structural studies on CoO-doped strontium phosphate glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 499, 153-158.