

İterbiyum-Katkılı Fiber Lazerle Q-Anahtarlamalı Modda İmplant Yüzeyi Mikro-İmalatı ve Karakterizasyonu

Serap ÇELEN^{1,*}, Hüseyin ÖZDEN², Erol UYAR³

¹*Makine Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, İzmir*

²*Makine Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, İzmir*

³*Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, İzmir*

Başvuru: 25/03/2013 Düzeltme: 27/05/2014 Kabul: 28/05/2014

ÖZET

Titanyum implantların yüzey morfolojileri, implantın yerleştirilmesini takip eden dönemde uzun-ömürlü stabilite açısından büyük öneme sahiptir. Titanyum dental implantların yüzey morfolojilerini modifiye etmek, kemik-implant temasındaki etkin yüzey alanını artırmak için farklı yüzey işlemleri kullanılmaktadır. Endüstriyel açıdan rekabetçi koşulların her geçen gün önemini artırdığı ve üretim zamanlarında bir saniyenin bile çok önemli olduğu günümüzde yeni üretim teknolojilerine ihtiyaç her zamankinden çok daha fazladır. Lazer yüzey yapılandırma yöntemi biyomedikal endüstrisinde malzemelerin yüzey özelliklerini modifiye etmek için eşsiz, gelecek vadeden, kontaminasyonsuz, temassız ve çevre dostu bir yüzey işlem tekniğidir. Bu çalışmada, Q-anahtarlamalı modda çalıştırılan iterbiyum-katkılı bir fiber lazerle saf titanyum implant yüzeylerinin yapılandırılması mikro boyutta gerçekleştirilmiş ve bu imal edilen yeni yüzeylerin karakterizasyonu yapılmıştır.

ABSTRACT

Surface morphologies of titanium implants has crucial importance for long-term stability which following their placement. Different techniques of surface modifications were adopted to increase bone-implant interface. Today there is a great needing to develop new surface modification methods when the industrial competitive conditions. Laser surface structuring is a unique, promising, clean, non-contact and environment-friendly method. At the present study, pure titanium implant surfaces were modified at micro-scale with using a fiber laser which working on Q-switched mode and their characterizations were conducted.

1. GİRİŞ

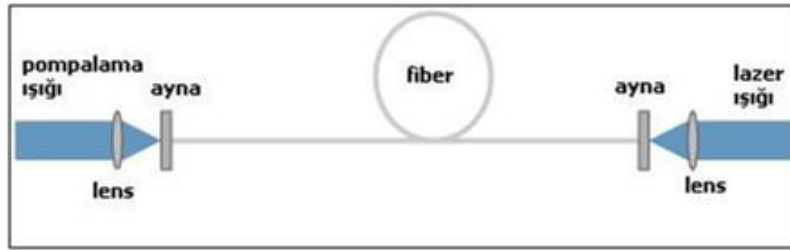
Fiber optik içerisinde ışığın yönlendirilmesi, iki yüz yıldır bilinen ışığın farklı maddeler arasındaki iç yansıma özelliği sayesinde mümkün olmaktadır. Cam fiberler 1920'lerde imal edildikleri halde, bir kaplayıcı katmanla kılavuzlama karakteristiklerinin iyileştirilmesinin gerçekleştirildiği 1950'lere kadar pratik kullanıma geçememişlerdir. 1970'ler öncesinde de, optik fiberler genellikle kısa uzaklıklarda medikal görüntüleme için

kullanılmaktaydılar. Haberleşme amacıyla kullanımları, o zamanki yüksek kayıplarından dolayı (~1000 dB/km) mümkün olamamıştı. 1970'lerde optik fiberdeki kayıplar 20 dB/km'ye kadar indirildi. Şimdi ise bu kayıp, 1.55 µm'lik spektral bölge yakınında 0.1 dB/km kadardır. Düşük kayıplı fiber kullanılabilirliği optik fiber haberleşmesinde olduğu kadar, malzemelerin hassas işlenmesinde bir devrime yol açmıştır [1].

Fiber lazerler, optik fiberlerin kazanç ortamı olarak kullanıldığı ve bir fiber rezonatöründen oluşan lazerlerdir. Genellikle, fiberin içerisine erbium (Er^{3+}), neodimiyum (Nd^{3+}), iterbiyum (Yb^{3+}), tulum (Tm^{3+}), veya praseodimium (Pr^{3+}) gibi nadir dünya elementlerinin iyonları katılmaktadır. Optik pompalama için ise bir veya birkaç tane lazer diyod birlikte kullanılmaktadır. Şekil 1’de basit bir fiber lazer şeması verilmiştir. Pompalama ışığı fiber özüne (çekirdeğine) sol taraftaki dikrokroik bir aynadan verilmektedir. Oluşturulan lazer ışığı sağ taraftan çıkmaktadır [2,3]. Fiber lazer, en az lazer kadar uzun bir tarihe sahiptir. İlk fiber lazer, 1963 yılında Elias Snitzer tarafından icat edilmesine rağmen, ilk ticari cihazların pazara sürülmeleri 1980’lerin sonlarında mümkün olmuş, yani 20 yıllık bir gelişim dönemi gerekmiştir. O dönemde bu lazerler, diyod pompalamalı ve tek modlu olarak kullanılmakta ve miliwatt’lık güçlerde çalışmaktaydılar. Bununla beraber, birçok lazer uygulamasında, optik güç için Watt’lar Miliwatt’lara tercih edilmektedirler. 1990 yılında, fiber lazer güç çıkışının Watt seviyelerine çıkması ilk olarak bir 4 Watt’lık erbium-katkılı fiber lazerle rapor edilmiştir. Bu gelişmenin temelinde, mikro-imalat ve diğer uygulamalar için, 10 Watt ve daha yüksek

tek-modlu fiber lazerlerin uygunluğu gerçeği yatmaktadır. Bir kilowatt ve üzerindeki çıkış güçleri, geniş mod alanına sahip olan nadir dünya elementleri katkılı bir fiber özü ve sürekli operasyonda çalışabilen diyod pompalama sistemi sayesinde elde edilebilmiştir. Fiber lazer sistemlerinin nanosaniyelik darbe sürelerinde, birkaç milijoule’lük darbe enerjileri ile çalıştırılmaları ise yakın zamanda iterbiyum-katkılı fiberlerle gerçekleştirilmiştir. Bu gelişme ile yüzey yapılandırılması işlemlerinde etkin olarak kullanılmalari mümkün olmuştur [1].

Temel olarak bir fiber lazer cihazı sadece dört adet bileşenden ibarettir; bunlar tarayıcı, lazer kafası, bağlantı hattı ve güç ünitesidir. Bağlantı hattı, herhangi bir takıma ihtiyaç duyulmadan bağlanıp, sökülecek şekilde bir fiş sistemine sahiptir. Bununla beraber uzun bağlantı kabloları hareket kolaylığı sağlamaktadır. Darbe güçleri 10 kilowatt’tan yüksektir ve düşük sapmalı (raksamalı) ışın kaliteleri, açık arayüz mimarisi, hava soğutmalı lazer kafası ve kolayca ulaşılabilen kontrol bileşenleri bu cihazları birçok uygulama için tercih edilebilir kılmaktadır [4,5].

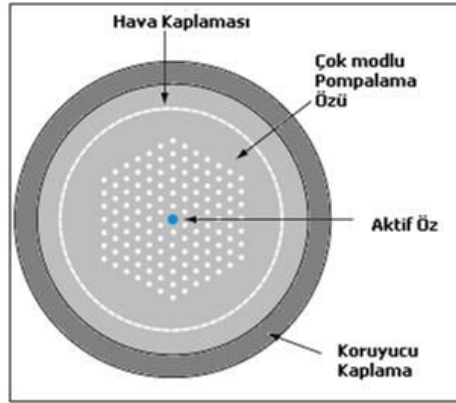


Şekil 1. Basit bir fiber lazer şeması [2]

Fiber lazerlerin daha ileri güç ölçeklemesi ve yükseltmesi yeni yüksek katkılı hava kaplamalı fotonik kristal fiberlerde öz çapının ve mod alanının artırılması ile mümkün olmuştur. (Şekil 2) Optik fiberlerin bu yeni sınıfı, fiberler boyunca dalga boyu ölçekli morfolojik mikro-yapıya dayalıdır. Bu durum, katı özlü fiberlerle karşılaştırıldıklarında daha iyi kılavuzlama özellikleri ile sonuçlanmaktadır. Böyle bir hava yapılandırılmalı 35 μm 'lik bir mod alan çapına sahip tek modlu bir fiber bir yansıma sınırlamalı çıkış gücünün hava soğutmalı operasyonda, 3 kW'tan daha fazla olduğu görülmüştür. Hava-mikroyapılandırılmalı fiberler su soğutması ile tek bir fiberden 10 kW'a kadar çıkış güçlerine izin vermektedirler. Hatta pikosaniyeden femtosaniyeye kadar indirilebilen ultrakısa operasyonda, 200 μJ 'den daha yüksek darbe enerjileri ile 1 MHz'e kadar darbe tekrar hızları mümkün olabilmektedir. Femtosaniye lazerleri Ti^{+3} :safir, Cr^{+3} :LiSAF ve Nd^{+3} :cam gibi bir fiber lazer ortamı ve optik pompalamalı bir lazer kurulumuna dayalı

olarak geliştirilmiştirler. Ultra kısa lazerler için kazanç ortamındaki kayıpların mutlaka engellenmesi gerekmektedir. Ti^{+3} :safir lazerleri birkaç yüz miliwatt'lık ortalama gücü 6 femto saniyenin altındaki darbe süreleri ile sağlayabilirler [6,7]. Ti^{+3} :safir lazeri için optik pompalama aracı argon lazeri veya bir katı-hal lazeri olabilirken, Cr^{+3} :LiSAF veya Yb^{+3} :cam lazerleri için ise yüksek-parlaklıkta diyod lazerleri kullanılmaktadır. Böylece 23 miliwattlık çıkış gücüne sahip olan 12 femtosaniye ve daha kısa darbe süreleri elde edilebilmektedir [7, 8]. Ayrıca eliptik tasarlanmış bir pompalama geometrisi içerisine yerleştirilen bir Nd^{+3} :cam kazanç ortamında, 1.4 wattlık çıkış gücü için 275 femto saniye darbe süresi ve 1 wattlık çıkış gücü için 175 femtosaniye darbe süresi rapor edilmiştir [7, 9, 10].

Bu parametreler bu lazerlerin yüzey işleme bilim ve teknolojisinde yeni uygulamalarına izin vermektedir [1].



Şekil 2. Modern hava kaplamalı bir çift-kaplamalı fiberin yapısı [3]

Günümüzde birkaç watt'tan 2 kilowatt'a kadar darbeli, Q-anahtarlamalı veya sürekli olarak çalışan plastik ve metalik malzemeleri kesme, markalama, delme ve oyma amaçlı olarak kullanılan fiber lazerler mevcuttur [5]. Fiber lazere dayalı mikro işlem cihazları yüksek güçlü, yüksek darbe tekrar hızları ve değişken tanımlanabilir darbe süresi ve şekli gibi önemli özelliklere sahiptir. 20-30 Watt'lık bir çıkış güç aralığına sahip olan darbeli lazerler 1 milijoullük darbe enerjisini geniş bir aralıkta ayarlanabilen darbe tekrar hızları ile malzemeye ulaştırabilmektedirler. Böylece imalat ve işlem kapasitesi ve hızı artabilmektedir. Darbeli modda genellikle 50 kHz-200 kHz frekans aralığında çalıştırılmaktadırlar. Geniş bir uygulama spektrumunda kullanılmaktadırlar. Derin oyma, ısıl işlem ve özel mikroyapılandırma uygulamaları gibi yüksek güç gereksinimi ve kısa işlem süreleri gerektiğinde kullanılırlar. Bazı gelişmiş modellerde, doğrudan tarama hızına göre yüksek darbe tekrar hızlarına kendini ayarlayabilen yüksek performanslı tarama modülleri söz konusudur. Böylece işlem süreleri kısaltılmakta ve özellikle ısıya hassasiyeti olan iş parçalarında mikro işlem yapılabilir [10].

Fiber lazer makinalarının konvansiyonel lazer makinalarına göre avantajları aşağıda verilmiştir. Bu avantajları sayesinde fiber lazerler, yüzey işlemlerinde diğer konvansiyonel lazerlere göre (diyod, Nd:YAG vb.) daha fazla tercih edilmektedirler.

- Yüksek bir verim ile yüksek lazer güçlerine ulaşılabilmesi,
- Yüksek malzeme işleme hızları,
- Mükemmel ışın kalitesi bu sayede yüksek kalitede malzeme işleminin gerçekleştirilebilmesi,
- Küçük boyutlu, kompakt, sağlam ve taşınabilir olmaları ve bu sayede mobil olarak işleme kabiliyeti,
- Kullanımlarının rahat ve basit olması,
- İşletme ömürlerinin yüksek olması, ilave tesisat gerektirmeden sanayi elektriği ile çalışabilmeleri,
- Çeşitli üretim endüstrilerinde ve tamir işlerinde kullanılabilmeleridir [5].

Gaggl ve diğerleri tarafından yapılan araştırmada titanyum implantların tasarım ve yüzey kalitelerinin implantasyonu takip eden dönemde uzun-sürelili stabilite için çok önemli olduğu vurgulanmıştır. Çalışmalarında dört farklı yüzey işleme tabi tutulan implantların analizleri yapılmıştır. Çalışmalarında, lazerle işlem görmüş titanyum yüzeyleri üzerine odaklanmışlar, 25 µm çapında, 20 µm derinliğinde ve 10-12 µm aralığındaki anizotropik düzenli mikrogözenekli yüzeyler elde etmişlerdir. Aynı araştırmada, lazerle işlem görmüş numunelerin yüzey pürüzlülüğünün 30-50 µm aralığında değiştiği bulunmuştur [11].

Karacs ve diğerleri tarafından yapılan bir diğer çalışmada, Nd:Cam lazer ışınımı kullanıldığında artan lazer enerjisi ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca Al₂O₃ kumlama ve ardından Nd:Cam lazeri ile işlem görmüş implantların yüzeyinde 10-30 µm aralığında değişen morfolojik yapıların oluştuğunu bulmuşlardır [12].

Peto ve diğerleride Nd:Cam lazer yüzey işleminin mikron altı boyutlardan 10 mikrona kadar izomorfik morfolojik yüzey yapıları oluşturduğunu göstermişlerdir. Ayrıca lazerle işlem görmüş yüzeylerin 50-100 µm aralıklı "donmuş ergiyik damlasal yapılar" şeklindeki periyodik dalga paternlerini gerçekleştirdiğini rapor etmişlerdir [13].

Ancak, mevcut çalışmalara bakıldığında iterbiyum-katkılı fiber lazerle yapılmış çok az çalışma söz konusudur. Bu sebepten bu araştırmada, saf titanyum numune yüzeyleri üzerinde hassas hareket kontrol sistemine sahip olan bir iterbium fiber lazeri ile 10 µm'den büyük yeni düzenli üç boyutlu paternler oluşturulmuş ve bu yeni yüzeylerin mikromorfolojik karakterizasyonunu gerçekleştirilmiştir [4].

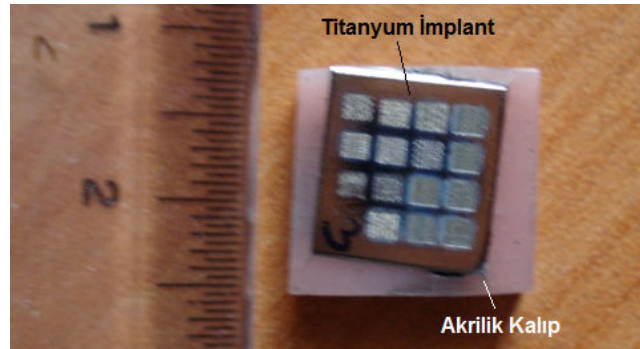
2. İTERBİYUM-KATKILI FİBER LAZERLE MİKRO-İMALAT

İterbiyum-katkılı fiber lazerle, Q-anahtarlamalı modda deneyleri gerçekleştirebilmek için, 2 mm kalınlığında 10*10 mm² karesel alana sahip ASTM B265 grade 2 ticari saflıkta titanyum numuneler kullanılmıştır. Alfa alaşımları, özellikle saf titanyum korozyon dayanımının önemli olduğu çeşitli biyomedikal uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Numuneler deney öncesinde

akrilik ile soğuk olarak kalıplanmış, daha sonra 300, 600, 1200 mikronluk zımparalama ve 6-1 mikronluk parlatma işlemlerine tabi tutulmuşlardır [4].

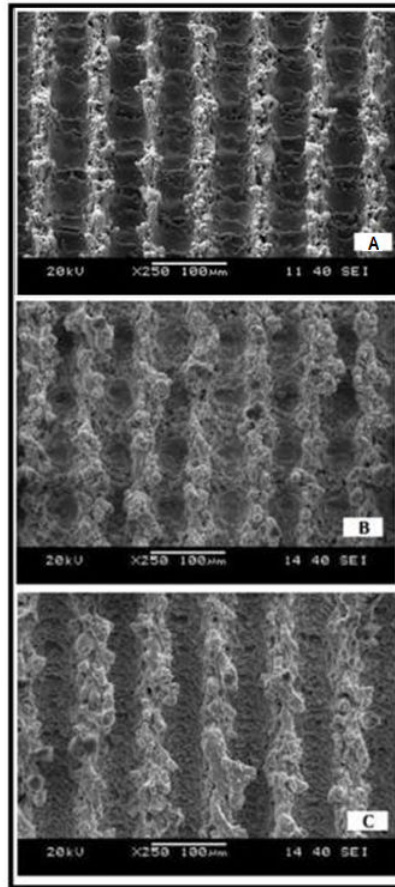
Lazer ile 1.5 mm² lik bir alan üzerinde işlem yapılmıştır. Numuneler lazerin ışınının yüzeylerine dik açıda gelebileceği şekilde yerleştirilmiştir. Lazer ışını 160 mm'lik F-theta lens ile numune üst yüzeyine

odaklanmıştır. Lazer odak çapı w_0 27 μm olarak hassas bir şekilde ayarlanmıştır. İmplant numune yüzeylerinin lazerle mikro imalatı, 200-250 ns darbe sürelerinde ve 50-150 mm/s lazer tarama hızlarında, 20 Watt'lık Telesis iterbium fiber lazerin (Ohio, USA) Q-anahtarlamalı moda kullanımı ile gerçekleştirilmiştir [4]. (Şekil 3)



Şekil 3. Lazer yüzey mikro-yapılandırma işlemi gerçekleştirilen bir numunenin fotoğrafı

Lazerle yüzey yapılandırması gerçekleştirilen bazı numunelerin SEM (JEOL, Japan) mikroskop fotoğrafları Şekil 4'de verilmiştir. Sonuç olarak, saf titanyum dental implant malzeme yüzeyleri üzerinde nanosaniyelik iterbium fiber lazer darbe süreleri kullanarak, tek ve çoklu pasolarla yeni düzenli 3D yüzey yapıları üretilmiştir [4].



Şekil 4. Farklı darbe süreleri ve darbe enerjileri ile lazerle yapılandırılan lineer geometrilerin SEM mikrofotografaları:

[A] 212.5 ns darbe süresi ve 1.7 mJ darbe enerjisi ile $w_i = 46 \mu\text{m}$, $s_i = 30 \mu\text{m}$ geometrik boyutlara sahip olarak yapılandırılan lineer geometri, [B] 200 ns darbe süresi ve 1.6 mJ darbe enerjisi ile $w_i = 42 \mu\text{m}$, $s_i = 36 \mu\text{m}$ geometrik boyutlara sahip olarak yapılandırılan lineer geometri, [C] 200 ns darbe süresi ve 1.6 mJ darbe enerjisi ile $w_i = 59 \mu\text{m}$, $s_i = 40 \mu\text{m}$ geometrik boyutlara sahip olarak yapılandırılan lineer geometri [4,14]

3. TARTIŞMA

Lazer; temassız, çok amaçlı olarak kullanılan bir takım olarak değerlendirilmektedir [5]. Endüstride, lazer teknolojinin kullanım alanları her geçen gün artmaktadır. Diş hekimliğinde, diş tedavilerinde de farklı amaçlarla kullanımı yaygınlaşmaktadır. İmplant uygulamalarında, malzemelerin işlenmesinde ve implant üretimi üzerine bilimsel araştırmalar sürdürülmektedir. Titanyum implant yüzeylerinin mikro-imalatında, lazer yüzey işlem yöntemlerinin uygulamasına yönelik yeni araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bu araştırmanın amacı da bu alandaki bilimsel çalışmalara katkı sağlamaktır. Bu çalışmada, titanyum implant yüzeylerinin lazer yüzey yapılandırma yönteminin uygulanabilirliği ve uygun modifikasyonların lazer işlem parametreleri değerlendirilmektedir.

Lazerle yapılandırılan titanyum dental implant yüzeylerinde, düşük lazer tarama hızlarında kayda değer buharlaşma elde edilemediği için malzeme yüzeyinde ergimiş sıvı metalin mikron ve mikron-altı boyutlarda hızla katıldığı görülmüştür. Bunun nedeni lazer tarama hızının titanyum malzeme buharlaşması üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğudur. Deneylerde lazer güç yoğunluğunun $13.92 \cdot 10^8 \text{ Watt/cm}^2$ değerine artırılmasıyla, saf titanyum için gerekli ablasyon eşiği değerine erişilmiş ve kayda değer buharlaşma gerçekleştirilmiştir. Titanyum dental implant numuneleri üzerinde yapılan bu deneysel araştırmalardan elde edilen değerlerin titanyum alaşımları ve benzeri malzemeler için geçerliliği söz konusu olmaktadır [4].

4. SONUÇLAR

Lazer yüzey yapılandırma yöntemi ile titanyum dental implantların üç boyutlu yüzey modifikasyonlarının araştırıldığı bu çalışmanın sonuçları aşağıdaki şekilde yorumlanmıştır. Uygun fiber lazer yüzey işlem parametreleri, önemli datalar önerilmiştir. Önemli sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- İterbiyum-katkılı fiber lazer yüzey işlem yöntemi ile mikro imalatı gerçekleştirilen titanyum dental implant yüzeylerinin mikroskop, taramalı elektron mikroskopu ile karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Lazer darbe enerjisinin, dolayısıyla lazer güç yoğunluğunun artırılmasıyla implanttaki tepe ve vadi genişliklerinin azaldığı görülmüştür .

- Enerji dağılım spektrometresi ile yapılan kimyasal testlerde fiber lazer yüzey işlem yöntemi ile mikro-imalatı gerçekleştirilen dental implant yüzeylerinde % 2.618 ağırlık oranına sahip karbon kontaminasyonu tespit edilmiştir. Oksijen miktarı ise % 22.049 ağırlık oranında bulunmuştur .
- İterbiyum-katkılı fiber lazerle mikro ölçekli olarak üretilen yeni üç boyutlu geometrik tekrarlanabilir kaliteli dental implant yüzeyleri için, lazer yüzey işlem parametreleri optimize edilmiştir. Lazer gücü; 20 W. Güç yoğunluğu $13 \cdot 10^8 \text{ W/mm}^2$. Lazer işlem hızı; 50 – 150 mm/s., Darbe etki süresi; 150- 250 nanosaniye. Odak noktası uzunluğu; 160 mm. Pozisyonu; malzeme yüzeyi üzeri. Bu değerlerde en etkin sonuçlar elde edilmektedir.
- Titanyum dental implantların üç boyutlu yüzey modifikasyonları tekrarlanabilir kalitede, kontrollü, dayanıklı ve hızlı üretim lazer yüzey işlem yöntemi ile gerçekleştirilmektedir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesinde sağladıkları altyapı desteğinden dolayı METROSAN Şti., METEOR Medikal A.Ş., LAZER METAL Ltd. Şti., İKON Makina Şti.'ne teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

- [1] Qui-hong L., Jun Z., “High Power Fiber Lasers”, *Front. Phys. China*, Cilt:2, No:4; s:410-423, *Higher Education Press and Springer-Verlag*, 2007.
- [2] Paschotta R., “Fiber Lasers, Encyclopedia of Laser Physics and Technology”, http://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html.
- [3] Paschotta R., “High Power Fiber Lasers and Amplifiers, Encyclopedia of Laser, Physics and Technology”, http://www.rp-photonics.com/high_power_fiber_lasers_and_amplifiers.html.
- [4] Çelen S., “Lazer Yüzey Yapılandırılması ile Oluşturulan İmplant Yüzeylerinin Mekanik Morfolojik Karakteristikleri”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2011.
- [5] Özden H., Investigating Fiber Lasers for Shipbuilding and Marine Construction-Laser-Welding In Shipbuilding And Marine Structures, *Welding Journal*, 865, s:26-29, 2007.
- [6] Sutter D.H., Steinmeyer G., Gallmann L., Matuschek N., Morier-Genoud F., Keller U., Scheuer V., Angelow G., Tschudi T. Semiconductor saturable-absorber mirror-assisted Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime, *Opt Lett.*, 24, s:631-633, 1999.

- [7] Fermann M.E., Galvanauskas A., Sucha G., *Ultrafast Lasers Technology and Applications*, Marcel Dekker Inc., 2003.
- [8] Uemura S, Torizuka K. Generation of 12-fs pulses from a diode-pumped Kerr-lens mode-locked Cr:LiSAF laser, *Opt. Lett.*, 24, s:780–782, 1999.
- [9] Paschotta R., Aus der Au J., Keller U. Thermal effects in high power endpumped lasers with elliptical mode geometry. *J Selected Topics Quantum Electron*, 6, s:636–642, 2000.
- [10] Paschotta R., Aus der Au J., Spuhler G.J., Morier-Genoud F., Hovel R., Moser M., Erhard S., Karszewski M., Giesen A., Keller U. Diode-pumped passively mode-locked lasers with high average power, *Appl Phys B*, 70, s25–31, 2000.
- [11] Gaggl A., Schultes G., Müller W. D. and Karcher H., “Scanning Electron Microscopical Analysis of Laser-Treated Titanium Implant Surfaces-a Comparative Study”, *Biomaterials*, 21, s:1067-1073, 2000.
- [12] Karacs A., Fancsaly., Divinyi T., Peto G. and Kovach G., Morphological And Animal Study of Titanium Dental Implant Surface Induced by Blasting and High Intensity Pulsed Nd-glass Laser, *Material Science and Engineering C*, 23:431-435, 2003.
- [13] Peto G., Karacs A., Pastzi Z., Guczi L., Divinji T. and Joob A., “Surface Treatment of Screw Shaped Titanium Dental Implants by High Intensity Laser Pulses”, *Applied Surface Science*, 186, s:7-13, 2002.
- [14] Çelen S., Özden H., Efeoğlu C. ve Çelen K.S., “Micromorphological Characterisation of Laser Modified Titanium Dental Implant Surface”, Proceedings of the Fifth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing, (Ed. Ostendorf A., Graf T., Petring D., Otto A.), *AT-Fachverlag GmbH*, Stuttgart, s:459-464, 2009