



## Doğrudan Metal Lazer Sinterleme Prosesi ve Dental Alanda Co-Cr Üretiminde Kullanımı

Özkan Özmen

Erciyes Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 38039

Cem Sinanoğlu

Erciyes Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Kayseri, 38039

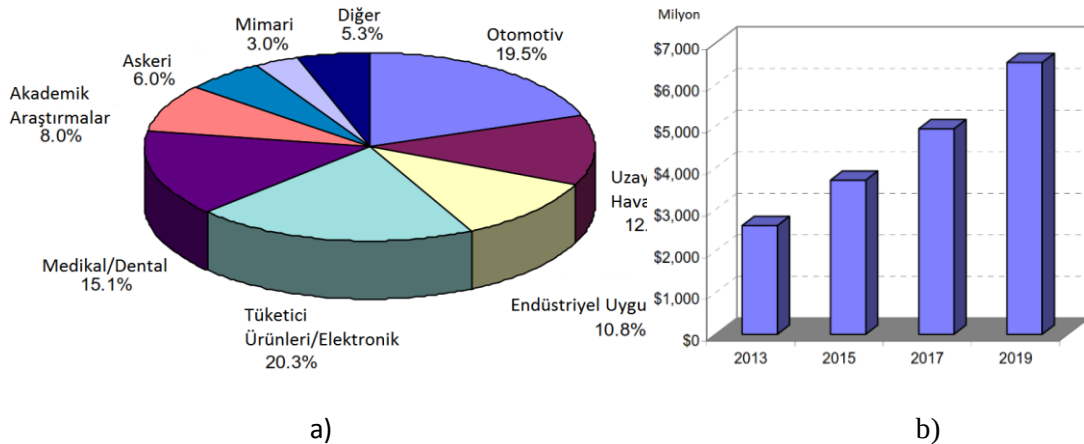
### ÖZET

Son yıllarda Katmanlı İmalat Teknolojileri'nde (KİT) çok büyük gelişmeler yaşanmıştır. Özellikle metal tozlarının bir enerji kaynağı (lazer, elektron ışını, vb.) aracılığıyla ergitilerek nihai ürünlerin üretiminin yapılabilmesi imalat teknolojilerinde yeni bir kapı aralamıştır. Son 10 yılda Doğrudan Metal Lazer Sinterleme (DMLS) üzerine çok çeşitli ticari ürünler piyasaya sunulmuş ve bu alanda ciddi bir pazar payı ortaya çıkmıştır. Ülkemizde de farklı alanlarda kullanılan DMLS teknolojisi özellikle dental sektörde kendisine belirgin şekilde yer edinmiştir. Bu çalışmada DMLS prosesi, gelişimi ve dental alanda kullanımı açıklanacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrudan Metal Lazer Sinterleme, Co-Cr Üye Üretimi

### 1 GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile beraber kullanım alanı artmakta olan DMLS teknolojisinin birçok farklı pazarda önemli bir paya sahip olduğu açıktır (Şekil 1). Bu metot ile uzay, otomotiv, elektronik, medikal, dental, kalıp, makine dâhil olmak üzere, bütün endüstri alanlarına yönelik klasik üretim metotlarıyla imal edilemeyecek kadar karmaşık parçalar üretilebilmektedir. Bu yöntemle üretim yapan makinelerin, yüksek fiyatlarına rağmen sağladıkları avantajlardan dolayı ülkemizde de birçok üniversite, araştırma merkezi, özel sektör, çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından alınmakta ve kullanılmaktadır.



Şekil 1. Katmanlı imalat teknolojisinin a) Kullanım alanları b) Yıllara göre tahmini pazarı [1].

## 2 DMLS PROSESİNİN GELİŞİMİ

DMLS prosesi, imalat alanının belirli bölgelerindeki metal tozlarının termal enerji yardımıyla birleştirildiği ve parçanın katman katman imal edildiği bir işlemdir. Metal tozlarını lazer ile ergiterek katı parçalar oluşturma fikri 1970'li yıllar da başlamış ve 1980'li yılların ortalarında genel olarak katmanlı imalat metotları ve toz tabanlı katmanlı prosesler için ilk ticari adımlar atılmıştır. İlk çalışmalarda kalay, çinko gibi tek fazlı metal malzemeler kullanılmış fakat başarısızlıkla sonuçlanmıştır. 1994 yılında ilk başarılı deneme ise Fraunhofer IPT tarafından 316L paslanmaz çelik tozu üzerine yapılmıştır. İlk ticari DMLS makinesi ise EOS tarafından 1995 yılında piyasaya sunulmuştur. Bu sistem 100 W'lık CO<sub>2</sub> lazer kullanarak 100  $\mu\text{m}$  katman kalınlığında üretim yapabilmekteydi. 2001 yılında, malzeme olarak çelik tozu kullanan DirectSteel 20 modeli ile de katman kalınlığı 20  $\mu\text{m}$  değerine kadar düşürülmüş ve üretim kalitesi artmıştır. Daha sonra DirectSteel H20 modeli ile takım çeliği tozları kullanılarak yoğunluğu yüksek, 1100 MPa çekme dayanımlı ve 42 Rockwell C sertliğine sahip parçalar üretilebilmiştir. Yine 2001 yılında ConceptLaser firması tarafından lazer sinterleme, lazer işaretleme ve lazer işlemeyi birleştiren yeni bir makine geliştirilmiştir. Bu makinede yttrium-alüminyum-garnet (YAG) lazer kullanılmış ve malzeme olarak paslanmaz çelik tozu ile yoğunluğu yüksek parçalar üretilmiştir. DMLS sistemlerinde başlangıçta lazer kesim ve lazer kaynak gibi lazer makine proseslerinde kullanılan standart tipteki CO<sub>2</sub> ve Nd: YAG lazerler devamlı mod da kullanılmıştı. CO<sub>2</sub> ve Nd: YAG lazerler arasındaki ana fark ise lazer ışınlarının dalga boyudur. Nd: YAG lazerler 1.06  $\mu\text{m}$  dalga boyuna sahipken CO<sub>2</sub> lazerler 10.6  $\mu\text{m}$  dalga boyuna sahiptir. Çoğu metalin absorptivitesi ise lazerin dalga boyunun küçülmesiyle artmaktadır. Tablo 1' de DMLS sisteminde genel olarak kullanılan metallerin absorptivitesi verilmiştir. Ayrıca aynı güç yoğunluğuna sahip lazerle yapılan çalışmalarda Nd: YAG lazerle daha uzun ergitme derinliğine ulaşılabildiği de görülmüştür [1-3].

Tablo 1. DMLS Sisteminde Genel Olarak Kullanılan Metallerin Abzorptivitesi

| Malzeme                                     | Nd: YAG lazer (1.06 $\mu\text{m}$ ) | CO <sub>2</sub> lazer (10.6 $\mu\text{m}$ ) |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|
| Cu                                          | 0.59                                | 0.26                                        |
| Fe                                          | 0.64                                | 0.45                                        |
| Sn                                          | 0.66                                | 0.23                                        |
| Ti                                          | 0.77                                | 0.59                                        |
| Pb                                          | 0.79                                | -                                           |
| Co-alaşımı (1% C; 28% Cr; 4% W)             | 0.58                                | 0.25                                        |
| Cu-alaşımı (10% Al)                         | 0.63                                | 0.32                                        |
| Ni-alaşım- I (13% Cr; 3% B; 4% Si; 0.6% C)  | 0.64                                | 0.42                                        |
| Ni-alaşım- II (15% Cr; 3.1% Si; 4%; 0.8% C) | 0.72                                | 0.51                                        |

Santos ve ark. CO<sub>2</sub> ve Nd: YAG lazerler ile Fe-Cu ve WC-Co toz malzemeler üzerine araştırmalar yapmıştır. Araştırmalar sonucunda aynı lazer enerjisine sahip CO<sub>2</sub> ve Nd: YAG lazerlerden, Nd: YAG lazer ile üretilen parçaların yoğunluğunun daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Osaka Üniversitesi'nde ortalama gücü 50W olan pulslu Nd: YAG lazer ile nikel, alüminyum, çelik, bronz ve titanyum üzerine başarılı çalışmalar yapılmıştır. Pulslu lazer yardımıyla yüksek puls enerjisini, kısa puls süresi ile uygulayarak toz malzeme üzerinde ısıdan etkilenen bölgeler azaltılabilmüş ve metalürjik olarak birbirlerine iyi kaynaşmış parçalar elde edilmiştir. Yapılan çalışmalarda üretilen parçalar arasında etkili bir yapışma elde etmek amacıyla, lazerin nüfuz etme derinliği ile katman kalınlığının aynı olmasının gerekli olduğu gözlemlenmiştir. Sonraki yıllarda lazerlerin odaklanmasını sağlayan optik lenslerde ve lazer teknolojisindeki gelişmeler sayesinde parçalardaki doğruluk ve yüzey kalitesi artmıştır. Bunlara paralel olarak fiber ve disk lazerler gibi yeni lazer tiplerinin gelişmesiyle ışın kalitesi de yükselmiştir. Tablo 2' te ticari olarak satılan cihazlarda kullanılan lazer tipleri gösterilmiştir. Bu ticari modellerdeki lazer güçleri 50W – 4kW arasındaki değişmekteyken CO<sub>2</sub> lazerde 18kW' a kadar çıkabilmektedir [2-5].

Tablo 2. Ticari DMLS Makinelerinin Kullandıkları Lazer Tipleri

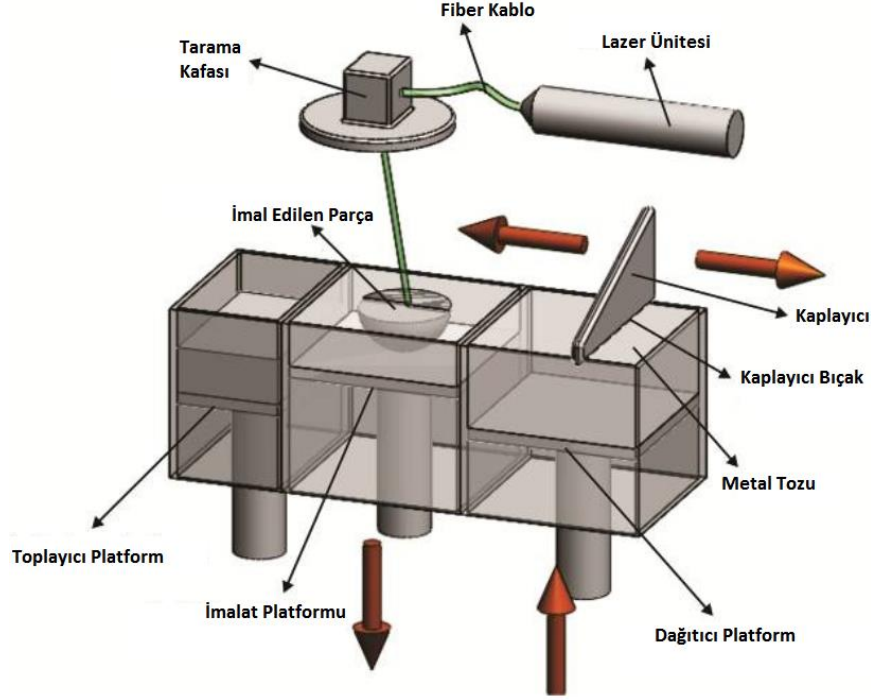
| Makineler       | Firmalar      | Prosesleri    | Lazer Tipleri   | Güçleri         |
|-----------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| Precious M 080  | Eos           | Dmls          | Ytterbium lazer | 100 W           |
| Eos M 280       | Eos           | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 200 W - 400 W   |
| Eos M 290       | Eos           | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 400 W           |
| Eos M 400       | Eos           | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 1000 W          |
| MlabCusing      | ConceptLazer  | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 50 W – 100 W    |
| MlabCusing R    | ConceptLazer  | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 100 W           |
| M1 Cusing       | ConceptLazer  | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 200 W           |
| M2 Cusing       | ConceptLazer  | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 200 W – 400 W   |
| Lumex Avance-25 | Matsuura      | Hibrit Proses | Ytterbiumlazer  | 400 W           |
| Lens 450        | Optomec       | Lens          | IPG Fiber lazer | 400W            |
| Lens Mr-7       | Optomec       | Lens          | IPG Fiber lazer | 500W – 2000 W   |
| Lens 850 R      | Optomec       | Lens          | IPG Fiber lazer | 1000 W - 4000 W |
| Pxl             | PhenixSystems | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 500 W           |
| Pxm             | PhenixSystems | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 300 W           |
| Pxs             | PhenixSystems | Dmls          | Ytterbiumlazer  | 50 W            |
| Slm 50          | Realizer      | Slm           | Fiber lazer     | 120 W           |
| Slm 100         | Realizer      | Slm           | Fiber lazer     | 200 W           |
| Slm 250         | Realizer      | Slm           | Fiber lazer     | 400 W – 600 W   |
| Slm 125HL       | SLM Solutions | Slm           | Ytterbiumlazer  | 100 – 200 W     |
| Slm 280HL       | SLM Solutions | Slm           | Ytterbiumlazer  | 400 – 1000 W    |
| Slm 500HL       | SLM Solutions | Slm           | Ytterbiumlazer  | 400 – 1000 W    |

### 3 DMLS PROSESİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

DMLS prosesi imalat alanının belirli bölgelerindeki metal tozlarının termal enerji yardımıyla kaynaştıran bir işlemdir. Bu süreçte genellikle termal enerji kaynağı olarak lazer ışını veya elektron ışını kullanılmaktadır [1]. Genel prensibi Şekil 2 'de verilen sistem üzerindeki terimlerin açıklaması aşağıda sunulmaktadır [6]:

- **Lazer Ünitesi:** Metal tozlarını eritmek için gerekli olan enerjiyi sağlamakta kullanılmaktadır. Lazer tipine göre farklılık gösterebilmektedir. Örn: CO<sub>2</sub> Lazer, Nd: YAG Lazer, Ytterbium fiber lazer gibi.
- **Fiber Kablo:** Lazer ünitesinde üretilen ışını tarama kafasına iletmek için kullanılır.
- **Tarama Kafası:** Lazer ışınını parçanın kesit alanın da gezdirerek ilgili katmandaki tozların ergitilmesini sağlar. Genellikle tarama kafası olarak iki eksenli hareket edebilen galvanometre aynaları kullanılır.
- **Kaplayıcı:** Bir motora bağlı olarak ileri-geri hareket eden bu kısım toz malzemeyi dağıtıcı platformdan imalat platformuna taşır. Üzerine toz malzemenin cinsine bağlı olarak farklı malzemelerden yapılmış kaplayıcı bıçak takılır.
- **Dağıtıcı platform:** İmalat aşamasının başlangıcında üretilecek parçaya bağlı olarak içerisinde yeterli miktarda toz malzeme barındırır.
- **İmalat platformu:** Bu platformda kullanılacak toz malzeme ile aynı malzemeden yapılmış tabla bulunur. Üretilecek parça bu platformda tabla üzerinde ve tablaya yapışık olarak imal edilir. İmalat işleminden sonra tel erozyon veya başka bir işlemle üretilen parça bu tabladan ayrılır ve bu tabla tekrar tekrar kullanılabilir.

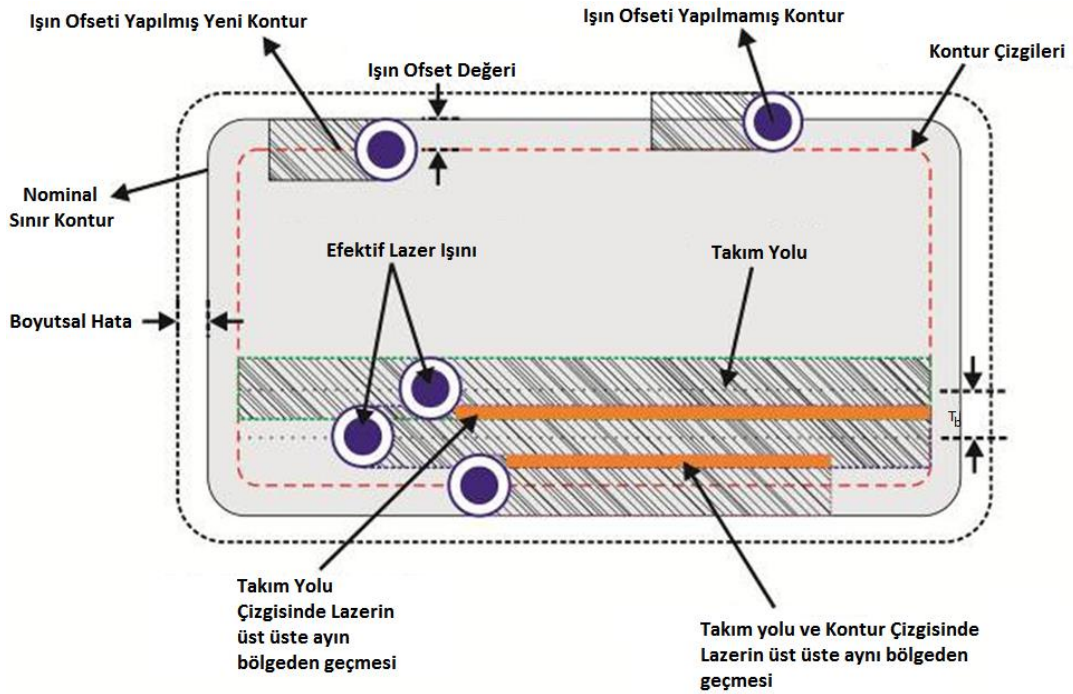
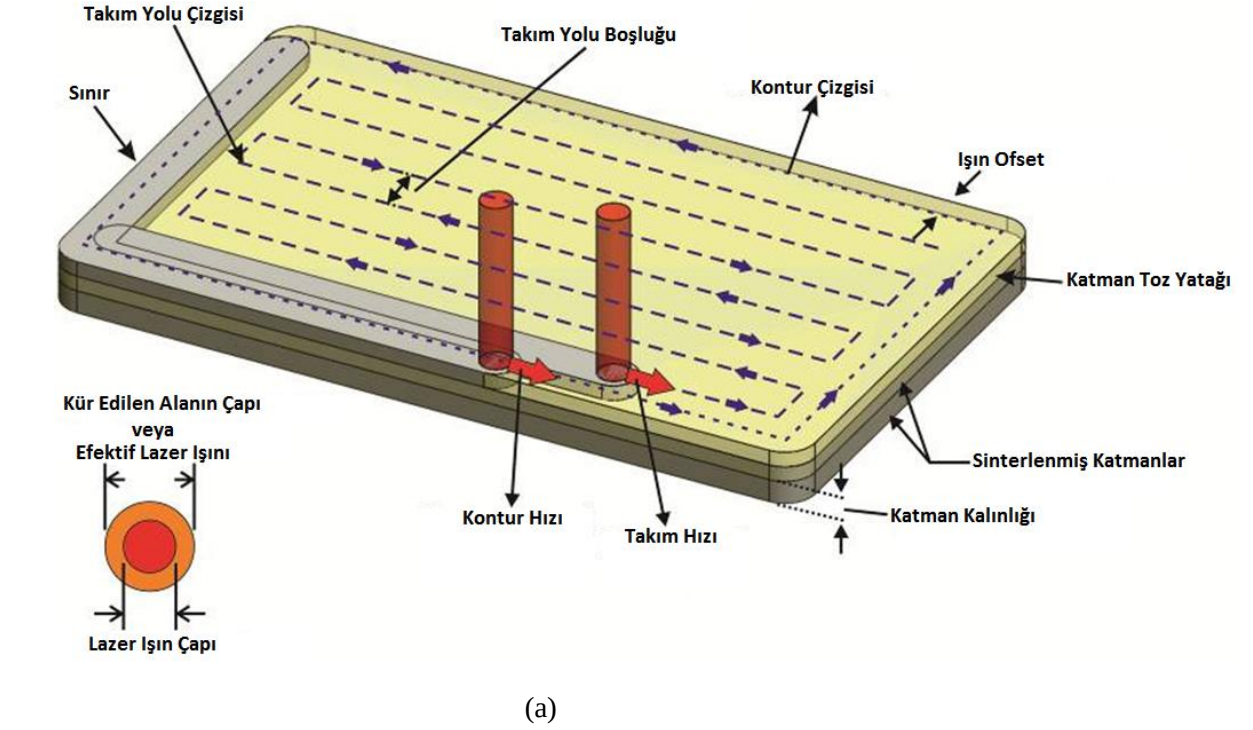
- **Toplayıcı platform:** Bu platformda toz serme işleminden artan tozlar toplanır. Bu tozlar bir elekten geçirilerek tekrar kullanılabilir.



Şekil 2. DMLS prosesinin şematik gösterimi

DMLS prosesinin ilk aşamasında kaplayıcı bıçak imalat alanının en sağ pozisyonuna gider. Dağıtıcı platform, imalat tablasına serilecek yeteri miktarda toz malzeme için bir katman kalınlığında yukarı çıkar. Daha sonra kaplayıcı bıçak imalat alanının sağından soluna doğru hareket ederek metal tozunu dağıtıcı platformdan, imalat tablasına serer ve fazla toz, toplayıcı haznede toplanır. Sonraki adım da tarama kafası imal edilecek 3 boyutlu (3B) nesnenin iki boyutlu kesit alanını lazer ile tarayarak toz malzemeden ilk katı katmanı oluşturur. Tarama işlemi bittikten sonra imalat tablası ve dağıtıcı tabla, kaplayıcı bıçakla herhangi bir çarpışma olmaması için bir katman kalınlığında aşağıya iner ve aynı proses imal edilecek parça tamamlanana kadar katman katman tekrarlanır. Böylece imal edilecek parçanın şekline göre birkaç saat içerisinde 3B karmaşık parçalar üretilebilir. Ek olarak, imalat sonrasında üretilen parçanın arzu edilen mekanik özellikleri sağlaması için ısıtılma işlemi veya yüzey kalitesi için taşlama gibi son işleme gerek duyabilir [6-7].

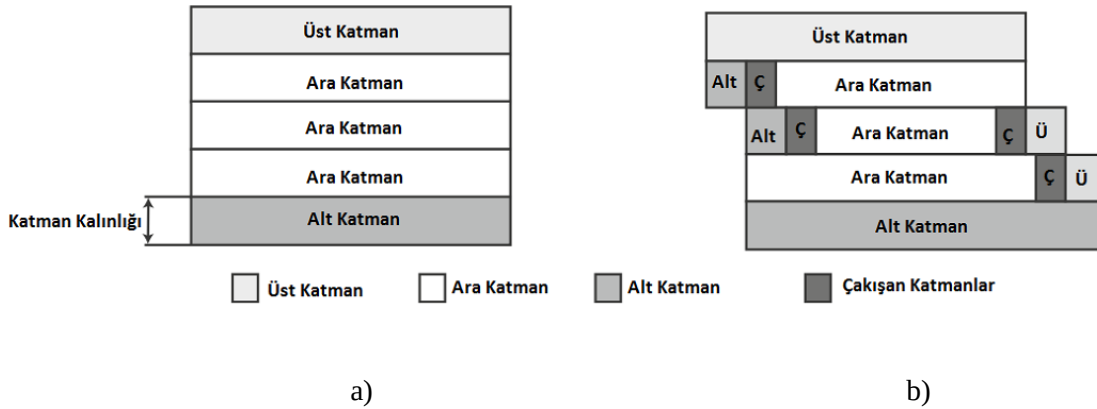
Şekil 3' de parçanın kesit alanı için ince bir toz tabakasının lazerle taranmış üst kısmı gösterilmektedir. Diğer üretim proseslerinde olduğu gibi DMLS prosesinde de imalat için bazı parametreler mevcuttur. Bunlardan birincisi imal edilecek parçanın kesit alanının lazer ile taranması için farklı tarama stratejileridir. Bu stratejiler artık gerilmeyi etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Başlangıçta, dış kısmı (kontur kısmı) lazer gücü ( $L_{gc}$ ) ve kontur ilerleme hızı ( $K_{ih}$ ) ile ergitilir. Lazer ışını, takım yolunu, sinterleme prosesi tamamlanana kadar izler. Takım yolları arasındaki mesafe takım yolu boşluğu ( $T_b$ ) olarak adlandırılır ve genellikle lazer ışınının dörtte birine ayarlanır. Ayrıca bu işlem esnasında sinterlenmiş bölgenin alanının genellikle lazer ışınının çapından daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bu da düzeltilmesi gereken bir çap hatasıdır. Parçanın orijinal bilgisayar destekli tasarım (BDT) verisiyle aynı olması için lazer ışını kontur kısmından içeri doğru yarım kür genişliğinde kaydırılmalıdır. Bu pozisyon düzeltme işlemine ışın ofseti ( $I_o$ ) denmektedir. Işın ofset değeri tanımlanarak sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Şayet bu değer olması gerekenden daha yüksek veya daha az ise, ısıtılmış bölgenin parçacıkları cürufu ya da aşırı sinterlenmiş olabilir.



Şekil 3. DMLS prosesinde imalat parametreleri. a) Katmanın 3B görünüşü. b) Katmanın üstten görünüşü



Bir diğer önemli parametre de parçada çarpılmaya veya prosesi durdurmaya yol açacak olan katman kalınlığıdır (Şekil 4). Bu süreçte her bir katmanın (Alt Katman, Ara Katman, Üst Katman, Çakışan Alanlar) özel imalat parametreleri ile sinterlenmesi gerekir. Alt katman üretilecek parçanın alt kısmını oluşturan ve tabla ile temas halinde olan katmandır. Bu kısım genellikle ilk 2 veya 3 katmandan oluşur. Alt katmanın farklı parametre değerleriyle sinterlenmesindeki amaç, tabla ile üretilecek parçanın birbirine sıkı bir şekilde kaynaması ve bu katmanın üst katmanların temelini oluşturmaktır. Alt ve üst katman arasında kalan kısım ara katman olarak tanımlanmaktadır. Ara katmanda, lazer ışınının nüfuz etme derinliğiyle, sinterlenen katmanın kalınlığı eşit olmalıdır. Lazerin nüfuz etme derinliğinin fazla olması, bir önceki katmanın erimesine yol açarak parçanın bozulmasına sebep olacaktır. Lazer ışını katman kalınlığından az nüfuz ederse sinterleme istenen seviyede gerçekleşmeyecek, bu da katmanların birbirlerinden ayrılmasına yol açacaktır. Ara katman, üretim alanının boyutuna göre istenilen yükseklikte olabilir. Üst katman, parçanın üst kısmını oluşturan bu alan genellikle son 3 veya 4 katmandan meydana gelmektedir. Çakışan alanlar, DMLS prosesinde üretilen parçanın şekline göre tek bir katman içerisinde ara katman, alt katman ve üst katman şeklinde bulunabilmektedir. Arada kalan bölgeler ise çakışan alan olarak tanımlanmakta ve farklı parametre değerleriyle sinterlenmektedir. Dolayısıyla, sinterlenen alanın çakışan alan olması durumunda, bu katmanın imalat parametre değerlerinin alt ve üst katman imalat parametre değerlerinden farklı olması gerekebilmektedir. Ayrıca katman kalınlığı çok büyük olursa, tekli katmanlar arasında uygun yapışma meydana gelmez ve alttaki katmanların ayrılmasına yol açabilir. Eğer katman kalınlığı çok küçük olursa, serici bıçak, toz sererken bir önceki katmanın sinterlenmiş kısmına çarpabilir ve alttaki katmanlarda yırtılma meydana getirebilir. Metal tozlarını tabla üzerine sermek için EOS, kendi patentli rijit kaplayıcı bıçak sistemini geliştirmiştir. Bu bıçak sisteminin esnek olmaması, serme esnasında çok yüksek kuvvetlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Bundan dolayı DMLS prosesinde çok hassas tabakalar üretmek için iyi bir mekanik tasarıma ihtiyaç olmuştur. Bu, özellikle çok ince tabakalar için önemli olmaktadır. Çünkü birkaç mikrometre tabaka kalınlığındaki bir sapma önemli bir hataya neden olmaktadır. Trumpf firması ise serici bıçak için esnek bir fırça kaplama sistemi kullanmıştır. Bir diğer yaklaşım ise her katmandaki lazer işleminden sonra ilgili katmanda son işlem yaparak hatayı düşürmektir. Fakat bu işlem yazılımı daha kompleks hale getirdiği gibi her katman oluşumunda ek prosesi gerekli kılmaktadır [6-7].



Şekil 4. Sinterleme işleminin yandan görünüşü. a) Çakışma olmadan üretim b) Ara katmanlarda çakışma meydana gelmesi.

DMLS prosesinde üretim parametreleri doğru şekilde seçildiği takdirde yoğunluğu yüksek ve mekanik özellikleri geleneksel imalat yöntemleriyle üretilen parçalara yakın özellikte üretim yapılabilmektedir. Fakat sürecin karmaşık olması ve kullanılan malzemelerin farklı özelliklerinden dolayı

üretileen parçanın mekanik özelliklerini ve yüzey kalitesini belirlemek için standart bir yöntem yoktur. Prosesin verimli bir şekilde çalışabilmesi için birçok parametrenin değerlendirilmesi gerekmektedir.

Delgado ve ark. demir-bazlı metal tozlarıyla yapmış oldukları araştırmalarda tarama hızı, katman kalınlığı ve parça imalat yönünün mekanik özelliklere ve yüzey kalitesine etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında boyutsal hata ve yüzey kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden birinin parçanın oryantasyonu olduğu belirlenmiştir [8]. Sachdeva ve ark. yapmış oldukları deneysel çalışmada üretilen parçaların yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Lazer gücü, yatak sıcaklığı, takım yolu boşluğu ve tarama sayısı parametreleri üzerine çalışmış ve bu verilerin optimum değerlerini belirleyerek yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin lazer gücü olduğunu gözlemlemişlerdir [9]. Song yapmış olduğu çalışmada lazer gücü, spot boyu, tarama hızı, takım yolu boşluğu ve katman kalınlığı gibi parametrelerin Cu-Sn toz malzemelerde etkisini incelemiştir [10]. Ning ve arkadaşları lazer tarama hızı ve gücü, katman kalınlığı ve tarama stratejisi değerlerini dikkate alarak DMLS prosesinde üretilen parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmek, geometrik doğruluğunu artırmak, yüzey pürüzlülüğünü ve proses zamanını azaltmak için ileri beslemeli yapay sinir ağı modeli oluşturarak en uygun parametre setini belirlemişlerdir [11].

Literatürde gerçekleştirilmiş olan çalışmalarda da görüldüğü gibi DMLS prosesinde istenilen yüzey kalitesini ve mekanik özellik değerlerini sağlayabilmek için kontrol edilmesi gereken birçok parametre mevcuttur. Bu parametrelerden lazer gücü, yüzey kalitesini etkileyen en önemli değişkenlerden birisidir. Tarama hızı ise sinterleme sırasında toz malzeme üzerindeki enerji girdisini belirler. Dolayısıyla parçanın yüzey kalitesine tarama hızının da etkisi vardır. Enerji yoğunluğunun hesaplaması ve Alüminyum tozunun EOS M270 Extended modelindeki imalat parametre değerleri Tablo 3’ te gösterilmiştir. Ayrıca üretilen parçalarda katman kalınlığı ve parçaların oryantasyonu parça üzerinde kötü yüzey kalitesine sebep olarak merdiven etkisi yapabilmektedir [12].

Enerji yoğunluğu hesaplaması

$$E = \frac{L_g}{T_b v} \quad (1)$$

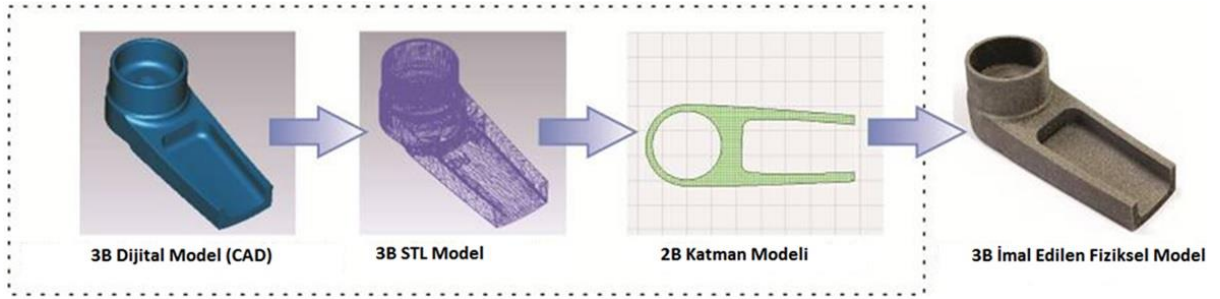
|       |   |                    |          |
|-------|---|--------------------|----------|
| $E$   | = | Enerji yoğunluğu   | $J/mm^2$ |
| $L_g$ | = | Lazer gücü         | W        |
| $T_b$ | = | Takım yolu boşluğu | mm       |
| $v$   | = | İlerleme hızı      | mm/s     |

Tablo 3. Alüminyum Tozunun İmalat Parametre Değerleri (EOS M270 Extended)

| Parametreler                 | Ara Katman | Üst Katman | Alt Katman | Kontur   |
|------------------------------|------------|------------|------------|----------|
| Tarama Hızı (v)              | 800 mm/s   | 1000 mm/s  | 900 mm/s   | 900 mm/s |
| Lazer Gücü ( $L_g$ )         | 195 W      | 195 W      | 190 W      | 80 W     |
| Takım Yolu Boşluğu ( $T_b$ ) | 0,17 mm    | 0,2 mm     | 0,1 mm     |          |
| <b>Enerji Yoğunluğu</b>      | 1,4338     | 0,9750     | 2,1111     |          |

Kullanılan imalat parametreleri her bir toz malzeme için farklı olmaktadır. Ayrıca proses esnasında oksidasyonu önlemek için ortama belli bir basınçta inert gaz gönderilir ve ortamdan oksijen uzaklaştırılır. Aktivasyon enerjisi düşük olan (Ti64 gibi) reaktif metaller için genellikle havadan ağır olan argon gazı kullanılmaktadır. Co-Cr, paslanmaz çelik ve kalıp çeliği gibi toz malzemelerde inert gaz olarak azot kullanılmaktadır.

DMLS sisteminde diğer bir önemli parametre ise BDT verisinin imalat için hazırlanmasıdır. Genel olarak, sanal bir nesneden fiziksel bir nesneye geçiş (tasarlanmış bir BDT verisiyle) katmanlı imalat metotlarında iki aşamada gerçekleştirilir. Bunlar sırasıyla verilerin hazırlanması ve parçanın imalat prosedürü olarak tanımlanır. Veriler ilk önce dijital modelin BDT sistemi yardımıyla oluşturulmasıyla başlar (Şekil 5). Daha sonra BDT modeli, özgün dosya formatından, STL dosya formatına dönüştürülür ve STL model birçok katmana ayrılarak parçanın imalatı için gerekli parametreler seçilir. Son işlemde ise model ilgili DMLS makinesi kullanılarak üretilir. Tüm süreç birkaç gün sürebileceği gibi birkaç saatte sürebilir [1].



Şekil 5. Katmanlı imalat metotlarında veri hazırlama safhaları

Tasarım programları üreten firmalar katkılı imalat yöntemlerinde kullanılmak üzere 3B verileri üretmek, oluşturmak ve modifiye etmek için özel dilimleme programları ve modülleri geliştirmişlerdir (Tablo 4).

Tablo 4. Katmanlı İmalat Proseslerinde Kullanılan Yazılımlar

| Program İsmi                 | Üretici Firma                 | Lisans                       |
|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Magics                       | Materialise                   | Ücretli                      |
| 3-matic                      | Materialise                   | Ücretli                      |
| Netfab (Studio Basic)        | Fruth Innovative Technologiën | Açık Kaynak kodlu (Ücretsiz) |
| Netfab (Studio Professional) | Fruth Innovative Technologiën | Ücretli                      |
| CADspan                      | LGM                           | Ücretli                      |
| 3Data Expert                 | Deskartes                     | Ücretli                      |
| VisCAM                       | Materialise                   | Ücretli                      |
| Meshlab                      | Meshlab                       | Açık Kaynak kodlu (Ücretsiz) |
| Mimic                        | Materialise                   | Ücretli                      |

Bölüm kapsamında DMLS prosesinin çalışma prensibi kısaca anlatılmıştır. Bir sonraki bölümde ise DMLS teknolojisinin ülkemizde en çok kullanılan alanı olan dental uygulamaları hakkında bilgi verilecektir.



#### 4 DMLS TEKNOLOJİSİNİN DENTAL ALANDA KULLANILMASI

Tıbbi görüntüleme teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte medikal ve dental alanlar katmanlı imalat uygulamaları içerisinde son 15 yılda en büyük üçüncü pazarı oluşturmuştur [1]. KİT' de tıbbi uygulamalar genel olarak medikal/dental ürün ve aletleri, prototipleri, biomodel ve anatomik modeller ile doğrudan olarak kişiye özel metal implant üretimini kapsamaktadır.

Ülkemizde de farklı alanlarda kullanılan DMLS teknolojisi özellikle dental sektörde kendisine belirgin şekilde yer edinmiştir. Dişlerin porselen ile kaplanması dişlerin şekil ve yapısının bozuk, estetik açıdan görüntü bozukluğu bulunan veya herhangi bir sebeple kırılmış, aşınmış, hasar görmüş, dolgu yapılamayacak kadar sorunlu olması durumunda yapılan bir uygulamadır. Her insanın çene ve diş şekilleri birbirinden farklı olduğu için dişlerin porselen ile kaplama uygulamasında kişiye özel üretim gerekmektedir. Değerli ya da alternatif alaşımlar protez rehabilitasyonu için diş hekimliğinde yıllardır kullanılmaktadır. Değerli alaşımların (altın, gümüş v.b.) maliyetlerinden dolayı diş hekimliğinde kullanımı sınırlı olup, değerli olmayan diş alaşımları tercih edilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan değerli olmayan metal alaşımları; sertlik, esneklik katsayısı ve gerilme mukavemeti gibi özelliklerinden dolayı metal, seramik restorasyonu için uygun olan kobalt-krom (Co-Cr) ve nikel-krom (Ni-Cr)'dur. Ancak, Avrupa Birliği ve ADA (American Dental Association – Amerika Diş Hekimleri Birliği), nikelin insanlar üzerindeki olası alerjik etkileşimlerinden dolayı nikel elementin kullanılmamasını önermektedir. Dişlerin porselenle kaplama uygulamasında porselen malzeme altına Co-Cr malzemeden hastadan alınan ölçüye göre metal altlıklar (üye, kron) üretilmektedir (Şekil 6). Co-Cr malzemeden üretilen üyeler daha sonra porselen kaplanmakta ve gerekli testlerden sonra hastanın ağzına takılmaktadır [13].



Şekil 6. Metal kobalt-krom altlıklı porselen dişler

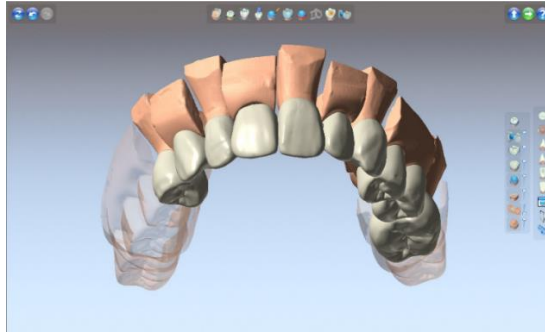
Co-Cr metal altlıklar klasik üretim yöntemi olarak mum kalıba dökülerek teknisyenler tarafından üretilmektedir. Bu üretim yönteminde her bir dişin farklı olması gerektiği için teknisyenlerin el becerisi ön plana çıkmakta ve zaman almaktadır (Şekil 7).



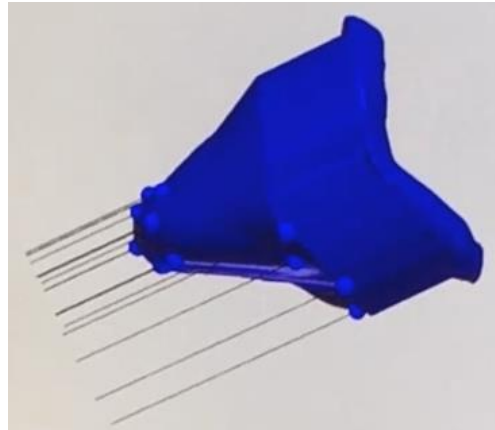
Şekil 7. Mum kalıba diş kalıbının dökümü [14].

DMLS metodu ile metal altlık üretmek ise son derece pratik hale gelmiş ve teknisyen ihtiyacını en aza indirmiştir. DMLS teknolojiyle imalat yapan diş kliniklerinde üretim işlemleri şu şekilde gerçekleşmektedir;

- Diş hekimlerinden gelen alçılar 3B tarayıcılar ile taranmakta ve hastanın diş yapısının BDT verisi elde edilmektedir.
- Elde edilen BDT verisi üzerinde hazır paket programlar vasıtasıyla eksik dişler yerleştirilir (Şekil 8).
- Belirlenen eksik dişlerin metal altlıkları Eos Rp Tools programına gönderilir ve program üzerinde üretilecek üyeler imalat tablası üzerine otomatik olarak yerleştirilir.
- İmalat tablasına yerleştirildikten sonra her bir üye veya köprü üyelerin destekleri teknisyen tarafından kontrol edilir gerekli görülürse tabla üzerinde üyenin konumu veya destekler üzerinde düzeltmeler yapılır ve veriler dilimlenip DMLS makinesinin arayüz programına gönderilir (Şekil 9).
- DMLS makinesin de imalat parametreleri belirlendikten sonra üretim gerçekleştirilir (Şekil 10).
- Üretim bittikten sonra parça üzerinde kalan artık gerilmeleri gidermek için imalat tablasıyla birlikte üyeler tavlama işlemine tabi tutulur.
- Tavlama işleminden sonra imalat tablası ve üyeler tel erezyon veya metal bir testere ile birbirlerinden ayrılır (Şekil 11).
- Metal üyeler porselen kaplanarak hastalarda kullanılabilecek şekilde hazır hale getirilir (Şekil 12).



Şekil 8. Hasta alçısından oluşturulan BDT verisi ve eksik dişlerin belirlenmesi



Şekil 9. Bir üye için destek malzemelerinin düzenlenmesi



Şekil 10. İmalat tablası üzerinde üretim sonrası üyeler [6].



Şekil 11. Porselen kaplamaya hazır hale getirilen Co-Cr üyeler



Şekil 12. Porselen kaplanmış ve kullanımına hazır hale getirilmiş dişler

## 5 SONUÇ

DMLS makinesinin özelliklerine göre imalat alanının boyutları, kullanılan lazerin gücü, optik lensler v.b. değişmektedir. Kullanılan optik lenslere göre imalat tablaları 8x8 cm' den başlayıp 40x40 cm' e kadar geniş bir aralıkta üretilmektedir. Bazı DMLS makinelerinde ise üretim hızını artırmak için çift lazer kullanılmaktadır. 20x20 cm imalat tablasına sahip 200W lazer gücüne sahip bir DMLS makinesinde aynı anda yaklaşık 400 adet üye 12-20 saat süre zarfında üretilmektedir. Diş klinikleri üye üretimi genellikle akşam saatlerinde başlatıp ertesi iş gününde porselen kaplamalar ile birlikte dişleri hazır hale getirebilmektedirler.

Dental alanda özellikle Co-Cr üye üretiminde hastaların kendi BDT verilerinden üretilmesi, hızlı ve çok sayıda üretim yapabilmesi, teknisyen ihtiyacını düşürmesi, gibi DMLS teknolojisinin faydaları açıkça görülmektedir. Üretilen Co-Cr üyeler diş doktoru, hasta ismi, tedavi edilen diş gibi hastanın tüm bilgileri kayıt altına alınarak ileride meydana gelebilecek sıkıntılarda dişin tüm üretim aşaması görülebilmektedir. Ayrıca diş laboratuvarları tehlike meslek alanında yer almaktadır. İş sağlığı ve güvenliği açısından klasik

yöntemlerle Co-Cr üye üretimi yapıldığında kalıp mumun ergitilmesi esnasında ortaya çıkan gazlar insan sağlığı açısından zararlıdır. DMLS yöntemi ile üretim yapıldığında mum kalıplar kullanılmadığı için zararlı gazlar ortaya çıkmamaktadır. Fakat bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Ülkemizde DMLS makinesi üreten bir firmanın bulunmayışından dolayı ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir. Bunun yanında servis, yedek parça, bakım ve onarım maliyetleri de yine aynı sebepten çok yüksektir. Ayrıca bazı DMLS makinesi üretici firmalar sadece kendi ürettikleri toz malzemelerin kullanılmasına izin vermektedir. Buda kullanıcıları firmalara bağımlı kılmaktadır. DMLS prosesine sahip bir makinenin dış laboratuvarında kullanılması için maliyetler dikkate alındığında günlük en az 200 adet üye üretiminin yapılması gerekmektedir. Avantaj ve dezavantajları dikkate alındığında KİT' nin giderek artan bir kullanım alanı olduğu açıktır ve gelecekte klasik imalat yöntemlerinin yerini alacaktır.

## REFERANSLAR

- [1] Wohlers, T. (2012). Wohlers Report 2012. Wohlers Associates, Inc.
- [2] Shellabear, M., and Nyrrilä, O. (2004). DMLS-Development history and state of the art. Laser Assisted Netshape Engineering 4, Proceedings of the 4th LANE, 21-24.
- [3] Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K., and Laoui, T. (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(12), 1459-1468.
- [4] Santos, E. C., Osakada, K., Shiomi, M., Kitamura, Y., and Abe, F. (2004). Microstructure and mechanical properties of pure titanium models fabricated by selective laser melting. Proceedings of the institution of mechanical engineers, part c: journal of mechanical engineering science, 218(7), 711-719.
- [5] Abe, F., Santos, E. C., Kitamura, Y., Osakada, K., and Shiomi, M. (2003). Influence of forming conditions on the titanium model in rapid prototyping with the selective laser melting process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 217(1), 119-126.
- [6] Web-1: <http://www.eos.info/en>, consulted 20 November 2015.
- [7] Senthilkumaran, K., Pandey, P. M., and Rao, P. V. M. (2009). Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering. Materials & Design, 30(8), 2946-2954.
- [8] Delgado, J., Ciurana, J., and Rodríguez, C. A. (2012). Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for DMLS and SLM with iron-based materials. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 60(5-8), 601-610.
- [9] Sachdeva, A., Singh, S., and Sharma, V. S. (2013). Investigating surface roughness of parts produced by SLS process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 64(9-12), 1505-1516.
- [10] Song, Y. A., and Koenig, W. (1997). Experimental study of the basic process mechanism for direct selective laser sintering of low-melting metallic powder. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 46(1), 127-130.
- [11] Ning, Y., Fuh, J. Y. H., Wong, Y. S., and Loh, H. T. (2004). An intelligent parameter selection system for the direct metal laser sintering process. International journal of production research, 42(1), 183-199.
- [12] Krishnan, M., Atzeni, E., Canali, R., Manfredi, D., Calignano, F., Ambrosio, E., and Iuliano, L. (2013, September). Influence of post-processing operations on mechanical properties of AlSi10Mg parts by DMLS. In High Value Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping: Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 1-5 October, 2013 (p. 243). CRC Press.
- [13] Web-2: <http://www.dissizler.com/>, consulted 20 November 2015.
- [14] Hacettepe Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi Protetik Dış Tedavi Anabilim Dalı Ders Notları 2010-2011.