



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 06.09.2023  
Kabul Tarihi : 17.10.2023

Received Date : 06.09.2023  
Accepted Date : 17.10.2023

### EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİNİN DEMİRYOLU ENDÜSTRİSİNDE KULLANIMI ÜZERİNE BİR DERLEME

#### A REVIEW ON THE USE OF ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGY IN THE RAILWAY INDUSTRY

İbrahim ASLAN<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-9157-9286)  
Ahmet CAN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-1231-7369)

<sup>1</sup> Amasya Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Amasya, Türkiye  
<sup>2</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Endüstriyel Tasarım Bölümü, Konya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İbrahim ASLAN, ibrahim.aslan@amasya.edu.tr

#### ÖZET

Eklemeli imalat, geleneksel üretim yöntemlerine göre nesnelerin katman katman üretildiği yenilikçi bir yöntemdir. Son yıllarda eklemeli imalatın kullanım alanları hızla artmaktadır. Bu imalat yönteminin birçok sektörde olduğu gibi demiryolu sektöründe de kullanım potansiyeli yüksektir. Demiryolu endüstrisinde eklemeli imalatın genel olarak; demiryolu altyapısında ve demiryolu üstyapısında, demiryolu araçlarında kullanıldığı görülmektedir. Eklemeli imalatın özellikle parçaların özelleştirilmesine olanak tanınması, karmaşık parçaların üretimi ve tasarım özgürlüğü, hızlı prototipleme, malzeme tasarrufu, düşük üretim maliyeti gibi avantajları, demiryolu endüstrisinde ve diğer endüstrilerde kullanımının yaygınlaşmasına olanak sağlamaktadır. Eklemeli imalatın malzeme sınırlamaları ve üretim hızı gibi bazı sınırlamaları olsa da, bu avantajların sunduğu imkanlar birçok alanda yeniliği teşvik etmektedir. Bu çalışmayla, demiryolu endüstrisi ve eklemeli imalat hakkında genel bilgiler verilmiştir. Ayrıca, eklemeli imalatın demiryolu endüstrisinde kullanımı ve kullanıldığı alanlar hakkında inceleme yapılmıştır. Çalışma sonucunda, araştırmacılar için eklemeli imalatın demiryolu endüstrisinde hangi alanlarda kullanıldığı, hangi alanlarda ise kullanımının eksik olduğunun görülmesi ile kullanım alanının geliştirilmesi sağlanmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Demiryolu endüstrisi, eklemeli imalat, raylı sistemler

#### ABSTRACT

Additive manufacturing is an innovative method where objects are produced layer by layer, unlike traditional production methods. In recent years, the applications of additive manufacturing have been rapidly expanding. The potential for using this manufacturing method is high not only in various sectors but also in the railway industry, just like many others. In the railway industry, additive manufacturing is commonly observed to be utilized in both railway infrastructure and superstructure, as well as in railway vehicles. The advantages of additive manufacturing, such as enabling customization of parts, production of complex components, design freedom, rapid prototyping, material savings, and low production costs, contribute to its widespread adoption not only in the railway industry but also in various other sectors. Despite certain limitations such as material restrictions and production speed, the opportunities presented by these advantages encourage innovation in numerous fields. This study provides general insights into the railway industry and additive manufacturing. Furthermore, it investigates the utilization of additive manufacturing in the railway industry and its various applications. As a result of this study, it aims to identify areas where additive manufacturing is already being employed within the railway industry and where it might be underutilized. This can help researchers work towards enhancing its application areas in the railway industry.

**Keywords:** Railway industry, additive manufacturing, rail systems

## GİRİŞ

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte demiryolu ulaşım sektörünün kullanım alanı artmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle aynı zamanda imalat sektöründe de önemli adımlar atılmaktadır. Eklemeli imalat da bu alanlarından birisidir. Demiryolu sektöründe lokomotif, vagon, altyapı ve üstyapı gibi bölümlerin oluşmasında geleneksel ve modern imalat yöntemlerinin önemi büyüktür. Modern imalat yöntemlerinden olan eklemeli imalatın demiryolu endüstrisinde kullanım alanlarının incelenmesi ve demiryollarında eklemeli imalat ile üretim imkânı olan alanların ortaya çıkması önem kazanmaktadır.

Demiryolları, şehirlerin ayrılmaz bir parçasıdır ve kentsel erişilebilirliği iyileştirmek ve şehirleri birbirine bağlamak için önemli etkileri vardır. Raylar üzerinde işleyen ve sadece belirli noktalarda duran raylı sistem, bu yönüyle diğer ulaşım türlerinden farklı olarak şehirlerle bağlantıların duraklar vasıtasıyla yapılması noktasındadır. Kent içi toplu taşımacılıkta, “demiryolu” yerine “raylı sistem” terimi kullanılır. Genellikle tercih edilen raylı taşımacılık tipleri; metro, hafif raylı sistem, teleferik, tramvay, füniküler, banliyö treni olarak listelenebilir (Ayyıldız & Eyigün, 2020).

Nüfusun, iş gücünün ve dolaşımdaki araç sayısının hızla artmasıyla trafik sorunlarının hızla arttığı günümüz kentlerinde, ekonomik ve verimli bir ulaşım sistemi kurmanın en temel şartı, diğer ulaşım sistemleriyle entegre bir demiryolu ağı kurmaktır. Raylı sistemin ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da insanların ekonomik ve sağlıklı seyahat etmesi yönünden avantajlıdır. İşletme maliyetlerini de dikkate alınırsa uzun vadede raylı sistem daha ekonomik olacaktır (Gündüz vd., 2011). Raylı sistemleri oluşturan bileşenlerin geleneksel ve modern imalat yöntemleriyle üretimi söz konusudur. Ancak son yıllarda eklemeli imalat gibi modern yöntemlerle üretiminin önem kazandığı görülmektedir.

Eklemeli imalat yöntemi, “katmanlı imalat” veya “3B yazıcı teknolojisi” olarak da bilinmektedir. Bu yöntem, dijital 3B verileri nesnelere dönüştüren bir teknolojiyi içermektedir. Bu yöntemin temeli, parçaları katman katman elde etmeye dayanmaktadır. Konvansiyonel yöntemlere göre karmaşık şekillere sahip parça üretme ve atık malzeme tasarrufu gibi üstün özelliklere sahiptir. Bu yöntemle üretilen parçalar genellikle düşük yoğunluk, yüksek mukavemet ve yüksek darbe direnci gibi mükemmel mekanik özelliklere sahiptir. Birçok endüstri için önemli olan tasarım esnekliği de bu yöntemin bir avantajıdır (Bozkurt vd., 2021).

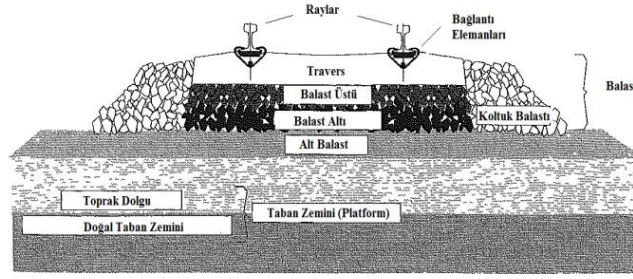
Eklemeli imalatın ortaya çıkışı, parça imalatında önemli bir gelişme ortaya koymuştur. Bu teknoloji, geliştirilmiş tasarımlara ve bileşenlerin hızlı üretimine olanak sağlamıştır. Özellikle karmaşık şekilli parçaların imalatını ve onarımını kolaylaştırmıştır. Eklemeli imalat teknolojisi ağırlıklı olarak havacılık, otomotiv, biyomedikal, savunma ve enerji sektörleri gibi büyük sanayi sektörlerine parça üretmek için kullanılmaktadır (Özsolak, 2019). Bu alanlara ek olarak, tıp, mimari, inşaat, uzay, eğitim, döküm, kuyumculuk, moda, raylı sistemler, tekstil gibi alanlarda da günümüzde bu teknoloji kullanılmaktadır.

Demiryollarının diğer ulaştırma türleri arasındaki avantajları ve eklemeli imalat teknolojisinin diğer imalat yöntemlerine göre faydaları göz önüne alındığında, demiryollarında eklemeli imalat teknolojisinin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Genel olarak demiryollarının altyapı, üstyapı elemanları, tren ve vagon parçaları gibi çeşitli kısımlarını oluşturan parçaların tasarım ve üretim alanında kullanımı önem kazanmaktadır.

## DEMİRYOLU ENDÜSTRİSİ

Endüstriyelleşme sürecinde üretimin kitleleşmesi sonucu ulaştırma türü olarak ortaya çıkan demiryolları, kömür, çelik ve diğer malların daha ucuz, daha hızlı ve daha düzenli olarak taşınmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek hızlı trenlerin gelişmesi ve yaygınlaşması, özellikle şehirlerarası orta mesafeli seyahatlerde demiryolunu, karayollarına ve hava yoluna tercih edilen bir alternatif haline getirmiştir (Kabasakal & Solak, 2009). Ayrıca, hızlı trenlerin gelişmesi demiryolu taşımacılığına olan talebi artırmıştır. Demiryolu taşımacılığı günümüzde en önemli ulaşım araçlarından biri haline gelmiştir Demiryolu taşımacılığının kalitesi ise doğrudan güvenlikle ilgilidir. Bu nedenle demiryolu bileşenlerinin üretimi ve arıza tespiti çok önemlidir (Sevi vd., 2022).

Demiryolu taşımacılığında raylar, hareket halindeki araçların (tren, vagon) tekerleklerine paralel olarak yerleştirilen metal çubuklardır. Bir demiryolu hattı birçok bileşenden oluşur (Sevi vd., 2022). Bir demiryolu hattının temel bileşenleri Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Demiryolu Hattının Temel Bileşenleri (Tacıroğlu, 2016).

Balastlı demiryolu hatları yapısal olarak altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısma ayrılır. Üst yapı, raylar, traversler, bağlantı elemanları, balast katmanları ve alt balast katmanlarından, altyapı ise sıkıştırılmış taban zemini ve formasyon katmanlarından oluşmaktadır (Tacıroğlu, 2016).

### Demiryolu Üstyapısı

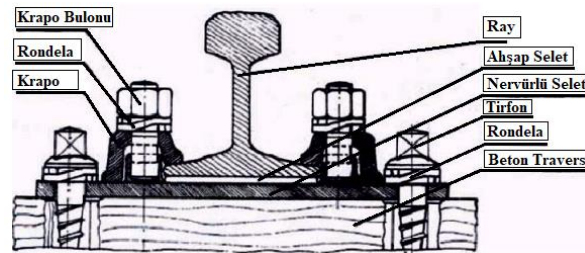
Demiryolu üst yapılarının temel rolü, tren yüklerini altyapının zarar görmemesi için dağıtmak ve rahatlatmaktır. Ray üstyapısının en üstünde bulunan raylar tekerlekleri yönlendirerek raylı taşıtın tekerlekleri için düşük dirençli bir hareket yüzeyi sağlar. Ayrıca dingillerden iletilen yükü traversler vasıtasıyla aşağıdaki katmanlara iletirler (Tacıroğlu, 2016).

Traversler, raydan gelen yükleri ve titreşimleri absorbe eden ve rayın şeklini koruyan altyapıya iletilmesinde büyük önem taşır. Raylı sistemlerde geçmişte ahşap ve çelik traversler kullanılmasına rağmen günümüzde dünyada en yaygın kullanılan traversler betonarme traverslerdir. Demiryolu işletme şartlarına göre değişmekle birlikte örneğin ülkemizin de üyesi olduğu UIC (Dünya Demiryolu Birliği) hatlarında traverslerde dünya çapında büyük bir tüketim söz konusudur. Traverslerin yoğun üretilmesinin nedenlerinden biri de önemli bir bölümünün beklenen 40-50 yıllık ömrüne ulaşamamasıdır (Çeçen & Aktaş, 2021).

Demiryolu üst yapısının traverslerinin konulduğu kırmataş tabakasına “balast” adı verilir. Çakıl balast olarak granit, yüksek fırın cürufu, bazalt, kireçtaşı, granüle ya da kırılmış kaya kullanılmaktadır. Tane yüzeylerinin hepsinin tamamen kırılmış olduğu ve demiryolu hatlarının inşasında kullanılan agregalar; yapay, doğal veya geri kazanılmış şekilde olabilmektedir (Yılmaz, 2015).

Rayları traverslere ve rayları birbiri ile bağlayan malzemelere küçük yol bağlantı malzemeleri denir. Rayı raya bağlayan küçük yol malzemeleri; cebire, rondela ve cebire bulonudur. Rayların birbirine bağlandıkları ek yerlerine conta denir. Rayların uçlarını birbirine bağlayan demir çubuklara cebire denir. Cebire bulonları gövde, baş ve somundan oluşur (Arlı, 2002).

Ray travers bağlantı malzemeleri ise; selet, krapo, travers bulonu, krapo bulonu, tirfon, ergodur. Ray tabanı ile travers arasına selet konur. Raydan gelen yükleri daha geniş bir yüzeye traverse iletir. Rayların devrilmesini önler ve ekartmanı muhafaza eder. Beton ve ahşap traversli yollarda rayı selet aracılığı ile traverse veya ray tabanını traverse bağlamak için tirfon kullanılmaktadır (Bilgiç, 2017). Bağlantılarına göre; ahşap travers, demir travers, blon-tirfon tipi, N tipi, K tipi ve HM tipi gibi travers çeşitleri bulunmaktadır. K tipi bağlantı Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. K Tipi Bağlantı (Bilgiç, 2017).

### Demiryolu Altyapısı

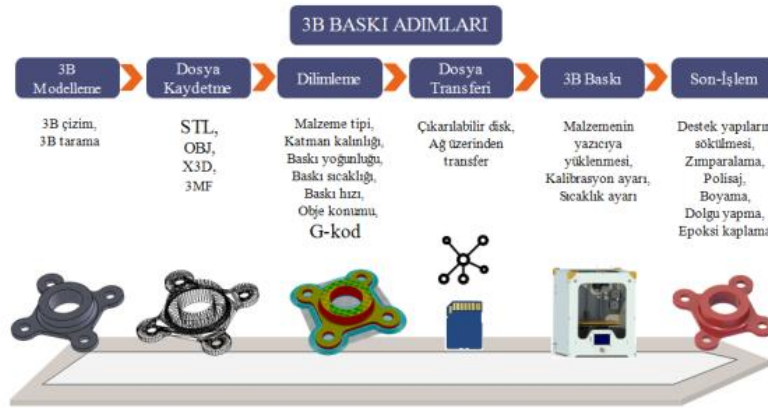
Beklenen hat kalitesinin ve işletme güvenliğinin sağlanması için demiryolu altyapısı çok önemlidir. Demiryolu altyapısının temel rolü, üstyapıdan aktarılan tren yüklerini taşımaktadır. Altyapı sadece sıkıştırılmış taban

zemininden oluştuğu gibi gerekirse taban zeminini üzerine bir formasyon katmanını inşa edilerek de oluşturulabilir. Formasyon tabakası ise taban zeminin yetersiz kaldığı durumlarda, üstü yapısı ile zemin arasına serilen tabakadır (Tacıroğlu, 2016).

## EKLEMELİ İMALAT

Katmanlı (eklemeli) imalat metal, kompozit, plastik ve organik malzemeler kullanılarak nesnelerin üç boyutlu (3B) geometrik verilerine göre oluşturulan katmanların üst üste eklenmesi ilkesine dayanan pratik bir üretim yöntemidir (Sürmen, 2019). Geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, malzemeden tasarruf sağlayan bu yöntem aynı zamanda kalıpsız parça üretebilme ve karmaşık şekilli parçalar için bile yüksek derecede tasarım özgürlüğüne sahip olma avantajına sahiptir. Eklemeli imalat ile üretilen parçalar genellikle düşük yoğunluk ve yüksek dayanım gibi iyi mekanik özelliklere sahiptir (Bozkurt vd., 2021).

Günümüzde, yaygın olarak 3B baskı olarak adlandırılan bu işlemin çatısı altında çeşitli teknolojiler bulunmaktadır. Ürünlerin farklı malzeme, mekanik ve geometrik özelliklerinden dolayı çeşitli eklemeli imalat teknikleri geliştirilerek ticarileştirilmekte ve biyomedikal, otomotiv, gıda, eğitim havacılık, medikal ve eğlence gibi sektörlerin hizmetine sunulmuştur. Hat kurulumu ve kalıp ihtiyacı olmadan, direkt tasarımdan üretime geçişe olanağı sağlayan 3B baskı işlemi genel olarak; 3B modelleme, dosya kaydetme, dilimleme, dosya transferi, 3B baskı ve son-işlem olmak üzere altı temel aşamadan oluşur (Şekil 3) (Sürmen, 2019).

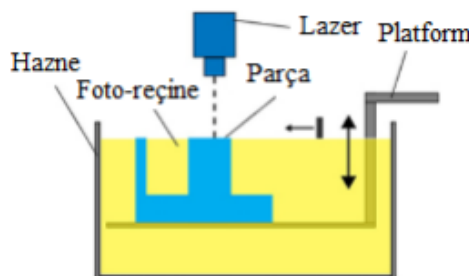


Şekil 3. 3B Baskı İşlem Basamakları (Sürmen, 2019).

Eklemeli imalat teknolojileri ISO/ASTM 52900:2015' e göre; bağlayıcı püskürtme, fotopolimerizasyon, malzeme püskürtme, malzeme ekstrüzyonu, direk enerji biriktirme, toz yatağında birleştirme, sac laminasyon olmak üzere yedi kategoride sınıflandırılmaktadır (Başçı & Yamanoğlu, 2021). Katmanlı imalat yöntemleri için farklı ölçütlere dayalı sınıflandırmalar da bulunmaktadır.

### Fotopolimerizasyon

Sıvı bir fotopolimer reçine tabakasının seçici bir şekilde ışınlar kullanılarak bir hazne içerisinde kürlenmesi prensibine dayanan sıvı bazlı bir işlemdir. Işının çarptığı bölgelerde polimerizasyon işlemi başlar ve bu bölgeler katılaştır. Platform daha sonra daha fazla katman oluşturmak için aşağı doğru hareket eder. Bu döngü ürün ortaya çıkana kadar tekrarlanır ve son olarak reçine dolu hazne boşaltılarak ürün dışarı çıkarılır. Bu yöntemin hızlı üretim süreci, mükemmel yüzey kalitesi ve yüksek boyutsal doğruluk gibi avantajları vardır, ancak diğer yöntemlere kıyasla pahalı ve sarf malzeme olarak foto reçine kullanımı ile sınırlıdır (Şekil 4) (Şen, 2023).



Şekil 4. Fotopolimerizasyon Prosesi (Şen, 2023).

### **Malzeme Püskürtme**

Malzeme püskürtme işleminde, platform üzerine damlacıklar halinde akıtılan malzeme tabakalar halinde katılaştırılarak parça oluşturulmaktadır. Sık kullanılan yöntemler arasında UV ışını ile sertleşen fotopolimer reçinenin püskürtülmesi veya oda sıcaklığında katılaştıran ısı olarak ergimiş malzemelerin püskürtülmesi teknikleri bulunmaktadır. Mum, polimer ve metal malzemeler kullanılarak bir veya daha fazla malzemeden yüksek boyutsal doğrulukta renkli parçalar üretilebilmektedir (Şen, 2023).

### **Bağlayıcı Püskürtme**

Bu yöntemde toz besleme ünitesindeki tozlar üretim alanına bir tabaka kalınlığına kadar serilmekte ve tozun üzerine seçici olarak bağlayıcı reçine püskürtülmektedir. Püskürtme prosesi ile iki boyutta istenilen şekil elde edilir ve bir tabakada imalat işlemi tamamlanır. Son parçayı elde etmek için son katmana kadar işlem adımları tekrarlanır. Malzeme toz halinde olduğundan herhangi bir destek kullanımı gerektirmez (Saltık & Özsoy, 2020).

### **Malzeme Ekstrüzyonu (Eriyik Yiğma Modelleme)**

Bu yöntemde yapının ham maddesi olan termoplastik malzeme, makaraya sarılan ince bir plastik filament şeklinde cihaza verilir. Bir dizi kontrollü düzenek aracılığıyla nozula beslenen filament, nozula ulaştığında termal olarak yarı erimiş bir duruma getirilir. Bilgisayar destekli imalat yazılımı ile iki eksende hareket ettirilebilen ekstrüzyon kafasından erimiş plastik malzeme sivri uçlu bir memeden dökülerek ince bir tabaka halinde yüzeye sıvanarak katmanlar oluşturulur. Her katmanda, platform bir adım aşağı iner, böylece parça tabakalar halinde oluşturulur. Erimiş malzeme yüzeye sıvandıkça sertleşir ve tüm katmanlar oluştuktan sonra parça tabladan kaldırılır. Gerekirse inşa sırasında destek görevi göreceği bir yapı da oluşturulur ve imalat tamamlandıktan sonra destek parçadan çıkarılır (Özsoy & Duman, 2017). Eriyik yiğma modelleme (FDM) olarak da bilinen bu yöntemde, inşa ve destek malzemesi olarak PLA ve ABS gibi yüzlerce polimer malzeme kullanılmaktadır.

### **Sac Laminasyon**

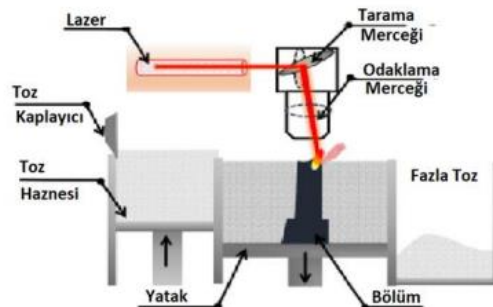
Bu yöntemde, sac halindeki hammaddeden, bilgisayar ortamında tasarlanmış parçaların kesici takım veya lazer kullanılarak aynı ölçülerde kesilmektedir. Sonrasında ise aynı şekilde kesilen ikinci katmanın ısı, kimyasal bağlayıcı, basınç, yapıştırıcı vb. ile üzerine bağlanması esasına dayanan hem çıkarma hem de ekleme yöntemidir. Hammadde olarak sac halindeki polimer, kompozit, metal, kâğıt vb. gibi malzemeler kullanılır (Yeşiloğlu, 2022).

### **Direkt Enerji Biriktirme**

Bilgisayar ortamında tasarlanan parçaların tel veya toz halindeki hammaddelerden lazer ışını, elektron ışınları, ark gibi enerji kaynakları ile eritilerek bir önceki katmanla birleştirilmesi esasına dayanan katmanlı imalat yöntemidir. Benzer yaklaşımlarla sistemdeki lazer gücü, enerji tipi, toz iletim metodu, lazer boyutu ve geri besleme sistemi vb. noktalarda çeşitli yöntemlerin kullanıldığı birçok ticari ad bulunmaktadır (Yeşiloğlu, 2022).

### **Toz Yatağında Birleştirme**

Bu yöntem genel olarak DMLS, elektron ışını eritme, SLS, multijet eritme, elektron ışını eritme ve seçici lazer eritme olmak üzere alt gruba ayrılmaktadır. Toz yataklı eritme yöntemlerinde, lazerler veya elektron ışınları tozları eritmek ve birleştirmek için kullanılır. Tüm toz yataklı eritme işlemlerinde, bir vakum gereklidir ve toz yatağının altındaki haznedan çıkan tozlar, bir silindir veya toz yayma pabucu kullanılarak ortalama 0,1 mm kalınlıkta bir toz katmanı inşa etme platformu üzerine serilir. Bu yayılan toz tabakasının lazerle sinterlenmesi ile ürünün ilk tabakası oluşturulur ve diğer tabakaları oluşturmak için aynı imalat çevrimi tekrarlanarak ürün elde edilir (Şekil 5) (Yalçın & Ergene, 2017).



Şekil 5. Toz Yataklı Eritme Prosesi (Çelebi & Koda, 2021).

## DEMİRYOLU ENDÜSTRİSİNDE EKLEMELİ İMALATIN KULLANILDIĞI ALANLAR

Demiryolu endüstrisinde eklemeli imalat genel olarak çeken ve çekilen araçları oluşturan parçalarda, demiryolu hattının altyapı ve üstyapı temel bileşenlerinin tasarım ve üretimi olmak üzere birçok kısmında kullanılmaktadır. Bu çalışmada da demiryolu endüstrisinde eklemeli imalatın kullanıldığı alanlar üç temel başlıkta ele alınmıştır.

### *Demiryolu Üstyapısında Eklemeli İmalatın Kullanımı*

Demiryolu hatlarında yolcu ve yük taşınması için taşıtların hareket etmesini sağlayan temel bileşen olan demiryolu üstyapısı çok önemlidir. Demiryolu üstyapısı genel olarak; ray, balast, travers, bağlantı elemanları ve özel parçalardan oluşmaktadır.

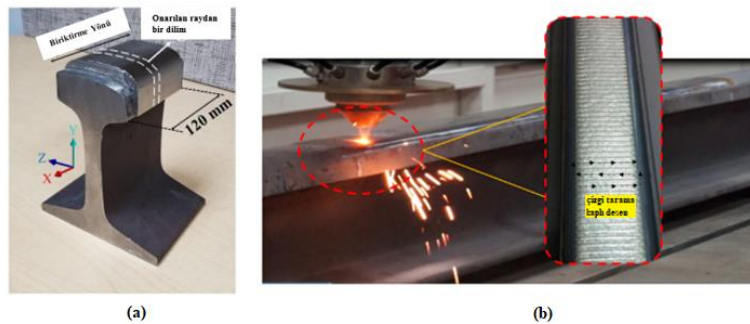
### *Ray*

Raylar, demiryolu hatlarında trenlerin hareket ettiği yol yüzeyini oluştururlar. Böylece trenler, yükleri taşıırken düzgün ve güvenli bir şekilde ilerleyebilirler. Ancak, rayların kullanım süresi arttıkça aşınma, çevresel şartlar gibi durumlardan dolayı tamiri veya değişimi gerekli olmaktadır. Rayların değişimi daha maliyetli olacağı için öncelik rayların tamir durumu değerlendirilmektedir.

Ray aşınmasını ve yuvarlanma temas yorgunluğu direncini iyileştirmek için, lazer eritme olarak da adlandırılan seçici lazer eritme (SLM) katkılı üretim teknolojisi, birçok araştırmacı tarafından ray üst yüzeylerinde geliştirilmiş bir katman oluşturmak için benimsenmiştir. Lazer kaplama teknolojisi ise ilk olarak ray başı alanında güçlendirilmiş bir katman oluşturmak için kullanılmıştır. Geçmiş onarım teknolojisiyle karşılaştırıldığında, eklemeli imalat yalnızca yerel gerçek hasarı onarmakla kalmaz, aynı zamanda ray performansını iyileştirebilir ve ray hizmet ömrünü uzatabilir (Fu & Kaewunruen, 2022).

Geleneksel yöntemlerle rayların tamir ve bakımın gerçekleştirildiği gibi günümüzde eklemeli imalat ile de hasarlı rayların tamiri gerçekleştirilebilmektedir. ABD demiryolu ulaşım sisteminde kullanılan aşınmış rayları onarmak için metal eklemeli imalat (AM) teknolojisini kullanmıştır. Çalışma sonucunda, eklemeli imalat ile onarılan rayın ortaya çıkan mekanik ve metalürjik özelliklerinin sonuçları değerlendirilmiştir (Mortazavian, 2022).

Nellian ve Pang (2023) yaptıkları çalışmada ise, ray çeliği numunelerinin metal eklemeli imalatla onarımının lazer metal biriktirme karakterizasyonunu araştırmışlardır. Çalışmada, lazer metal biriktirme işlemi kullanılarak Stellite 6 tozu ile ray çeliği onarımına ilişkin araştırma yapmışlardır. Kobalt bazlı bir alaşım olan Stellite 6'nın, kafası sertleştirilmiş R350HT sınıfı ray çeliği alt tabakası ile biriktirilmiş malzeme uyumluluğunu incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, demiryolu çeliği bileşenlerinin lazer metal biriktirme işlemi ile kaplamalı onarımının, demiryolu çeliği onarım operasyonları için gelecekte kullanıma yönelik önemli bir potansiyele sahip olduğu ifade edilmiştir (Şekil 6) (Nellian & Pang, 2023).

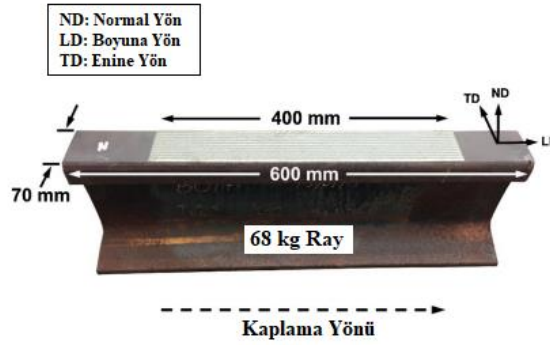


**Şekil 6. a.** Eklemeli İmalatla Tamir Edilmiş Ray (Mortazavian, 2022) **b.** Stellite 6, R350HT Ray Kafası Bölümünde Biriktirilme İşlemi (Nellian & Pang, 2023).

Bir ray üzerine, lazer ile ergitilmiş toz püskürtülerek yapılan dolgu işleminde rayın mekanik özellikleri, malzeme türünden, alaşım tozlarının tanecikli yapısından ve 3B baskı işlemlerinden etkilenmektedir. Kaplama tabakası, temel malzeme tipine göre Fe bazlı, Ni bazlı, Co bazlı ve diğer tiplerde sınıflandırılabilir (Fu & Kaewunruen, 2022).

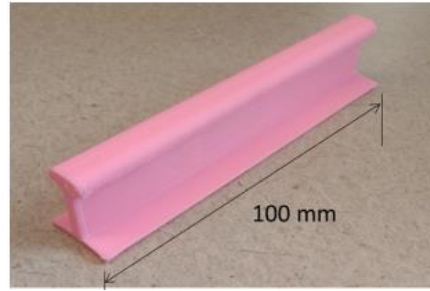
Lai vd., (2019) yaptıkları çalışmada, malzeme biriktirme, işleme parametreleri ve ısıtma koşullarının lazerle kaplanmış ötektoid üstü rayların malzeme özelliklerine etkisini incelemişlerdir (Şekil 7). Farklı kaplama malzemeleri ve işlem parametrelerinin karşılaştırmalı çalışması için 410L, 420SS, Stellite 6 ve Stellite 21'in tek ve çift biriktirmeli kaplama malzemeleri dikkate alınmıştır. Karşılaştırma amacıyla kaplamaların sabit kalınlığını sağlamak için enine

hız ve toz besleme hızı, sırasıyla 1000–1200 mm/dk ve 3–4 rpm aralıklarında eş zamanlı olarak değiştirilmiştir. Ray-tekerlek teması için en uygun kaplama malzemesi, yüzey kusurları, sertlik, mikroyapısal ve mekanik özellikler gibi tüm önemli hususlar değerlendirilerek belirlenmiştir (Lai vd., 2019).



Şekil 7. Lazerle Kaplanmış Ray Numunesi (Lai vd., 2019).

Çeşitli demiryolu araçları için de eklemeli imalatla ray üretimi gerçekleştirilmektedir. 3B baskı teknolojisi kullanılarak mikro insan taşıyan araçlar için demiryolu raylarının tasarımı ve prototipi araştırmacılar tarafından üretilmiştir. Prototipleme için FDM teknolojisi ve malzeme olarak PLA (polilaktit) seçilmiştir. Basılı rayların taşıma kapasitesini belirlemek için hem basma hem de eğilme testleri yapılmıştır. Sonuçlar, beklendiği gibi, yük kapasitesinin ve hata modlarının, 3B yazdırılan parçaların fiber içeriğine ve katman yönlerine bağlı olduğunu göstermiştir (Şekil 8) (Chen vd., 2021).



Şekil 8. 3B Basılmış Demiryolu Rayı (Chen vd., 2021).

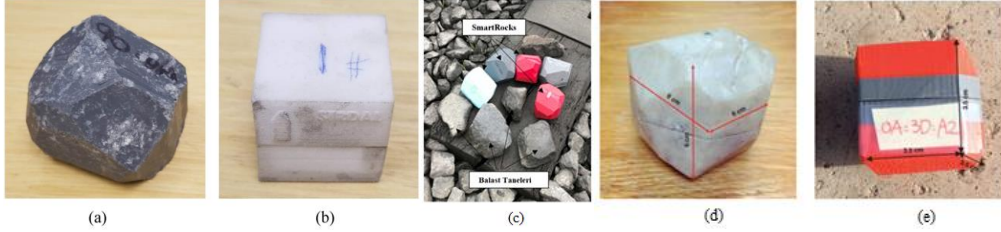
### Balast

Balast parçacıkları dinamik tren yükleri altında hareket eder, döner ve birbirleriyle etkileşime girer ve sonra bozulur. Balastlı bir hattın bakımı, balastlı hattı yeterli sağlamlık ve elastikiyetle tutmak için önemlidir (Fu & Kaewunruen, 2022). Demiryolu hattı altyapısında, balastların hareketini incelemek için balast benzeri parçalar eklemeli imalat ile üretilmektedir.

Zeng vd., (2019) yaptıkları çalışmada, SmartRock ve patern tanımayı kullanarak balast durumu belirlenmiştir. Balast durumunun doğru ve zamanında izlenmesi demiryolunun güvenli işletimi ve etkili bakım açısından kritik öneme sahiptir. Çalışmada, farklı koşullar altında farklı balast hareket modellerini incelemek için üç farklı lokasyondaki laboratuvar testlerinde sekiz adet kablosuz gömülü cihaz (SmartRocks) kullanılmıştır. SmartRock'un kabuğunu oluşturmak ve onu gerçek bir balast şekline dönüştürmek için 3B baskı teknolojisi kullanılmıştır. Yapılan çalışmanın güvenilir bir balast durumu tanımlama endeksinin geliştirilmesine yönelik bir ön adımı temsil ettiği ifade edilmiştir (Zeng vd., 2019).

Liu vd., (2019) yaptıkları çalışmada, çamur noktasında balast parçacık hareketinin karakterizasyonunu araştırmışlardır. 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretilen ve bir balast parçasını andıran pille çalışan kablosuz cihaz SmartRock, hareketini gerçek zamanlı olarak algılayıp kaydedebilmekte ve iletebilmektedir. Hem yük hem de yolcu trenleri altındaki parçacık hareketini araştırmak için her bölümdeki balast yataklarına SmartRocks yerleştirilmiştir. Sonuçlar, farklı yük trenleri altında temiz ve çamurlu noktalardaki bağlantı ve balast partikül hareketinin farklılıklarını göstermiştir. Test sonuçları, gelecekte büyük onarımları önlemek amacıyla ray üzerindeki potansiyel sorunlu yerleri belirlemek için kullanılabileceğini göstermiştir (Liu vd., 2019).

Liu vd., (2017) yaptıkları çalışmada, çift eksenli ve çok eksenli georidlerle stabilize edilmiş bir balast hattı yapısındaki parçacık hareketini karşılaştırmalı değerlendirmiştir. SmartRock'u bir balast parçacığı gibi şekillendirmek için üç boyutlu baskı teknolojisi kullanılmıştır. Georidler genellikle demiryolu hattı alt yapısında, zayıf bir alt zemin üzerinde balast takviyesi ve stabilizasyon için kullanılır. Farklı açıklık şekilleri, benzersiz kilitleme mekanizması nedeniyle balast parçacıkları üzerindeki sınırlayıcı etkiyi etkiler. SmartRocks olarak bilinen dört kablosuz cihaz, balast-alt balast ve alt balast-alt zemin arayüzlerinde ray yatağının altına ve banketin altına gömülmüştür. Çalışmada, parçacık hareketinin azaltılması ve balast yüzeyinin düşey yer değiştirmesinin azaltılması da dahil olmak üzere çok eksenli bir georid tabakasına sahip olmanın avantajları tartışılmıştır (Liu vd., 2017). SmartRock parçalarının fotoğrafları Şekil 9'da verilmiştir.



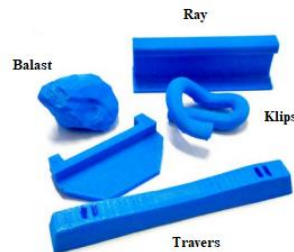
**Şekil 9.** SmartRock'un Fotoğrafları **a.** Büyük, Köşeli SmartRock **b.** Küçük Kübik SmartRock (Zeng vd., 2019) **c.** Balast Taneleri, SmartRocks (Liu vd., 2019) **d.** SmartRock'ın Ölçüleri Büyük Parça **e.** SmartRock'ın Ölçüleri Küçük Parça (Liu vd., 2017).

Ayrıca, Fereshnejad ve Song (2016) yaptıkları çalışmada, toz tabanlı 3B yazıcının kaya mekaniğinde fiziksel modellemeye uygulanabilirliği üzerine temel araştırma yapmışlardır. Çalışmada, kaya mekaniği uygulamaları için toz bazlı 3B yazıcı numunelerinin mekanik özelliklerindeki iyileştirmeler araştırılmıştır. Çalışma sonucunda 3BP teknolojisi, kaya mühendisliği problemlerini çözmede büyük bir potansiyele sahip olduğu belirlenmiştir (Fereshnejad & Song, 2016).

### Travers

Ahşap traversler ve beton traversler için eklemeli imalat teknolojileri ile ilgili herhangi bir araştırma yapılmadığı görülmüştür. Ancak bazı araştırmacılar traverslerin şekil optimizasyonunu gerçekleştirmişler. Araştırma amaçlı karmaşık şekillere sahip prototip traversler, 3B baskı işlemi kullanılarak kolayca üretilebilmektedir (Fu & Kaewunruen, 2022).

Broekman ve Gräbe (2021) yaptıkları çalışmada, derin öğrenme demiryolu uygulamaları için sanal ortamların geliştirilmesini araştırmışlardır. Özellikle ulaşım uygulamaları için sağlam yapay zeka sistemlerinin geliştirilmesi büyük ölçüde etiketli büyük veri kümelerinin varlığına bağlıdır. Yapılan çalışmada, ticari olarak temin edilebilen bir 3B yazıcı kullanılarak, demiryolu bileşenlerinin her birinin kopyaları mavi renkli PLA filamenti kullanılarak basılmıştır (Şekil 10). Niteliksel değerlendirme için basılan bu parçalarda renk, ağırlık her bileşenin geometrik özelliklerini genelleştirme yeteneğini test etmek için özel olarak seçilmiştir. Çalışmada önerilen dijital iş akışı, son teknolojiye sahip sinir ağları için gereken veri kümelerinin geliştirilmesinde harcanan zamanı ve maliyeti önemli ölçüde azaltırken, bu modeller için gereken aslına uygunluğu ve gerçekçiliği de koruduğu ifade edilmiştir (Broekman & Gräbe, 2021).



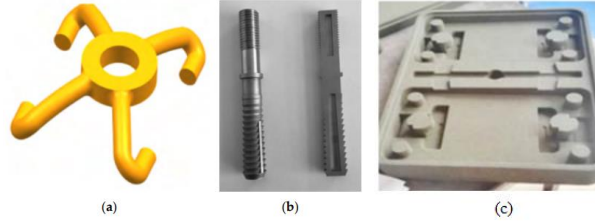
**Şekil 10.** Kalitatif Değerlendirme İçin 3B Basılı Parça Bileşenleri (Broekman & Gräbe, 2021).

### Bağlantı Elemanları

Demiryolu bağlantı elemanı sistemi, traversler veya ray döşemeleri üzerindeki rayların sabitlenmesine yardımcı olur ve raylar için esneklik sağlar (Fu & Kaewunruen, 2022). Demiryolu hatlarında çok sayıda bağlantı elemanı kullanıldığı için maliyet açısından geometrik optimizasyonu da önemlidir. Bu sebeple vida ve klips gibi bağlantı

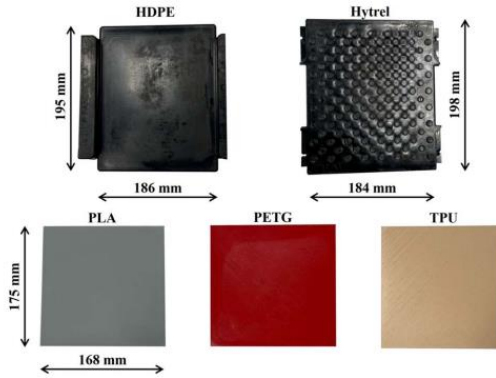


parçalarının optimizasyonu için eklemeli imalat kullanılmaktadır (Şekil 11a-11b). Ayrıca, bağlantı elemanlarının rayın sabitlenmesinde yardımcı olduğu için dayanımı da önemlidir. Bağlantı elemanı çelik levhası ise döküm yöntemiyle üretilmektedir. Ancak bu parçanın dökümünün yapılabilmesi için kum kalıp gerekmektedir. Karmaşık geometrilere sahip metal parçaların dökümü için 3B baskılı kum kalıplar eklemeli imalat ile üretilmektedir (Şekil 11c).



**Şekil 11.** Demiryolu Bağlantı Elemanlarının Optimizasyonu **a.** Klips, **b.** Vida **c.** Bağlantı Elemanı Çelik Levhası İçin 3B Baskılı Kalıplar (Fu & Kaewunruen, 2022).

Ray altı yastığı, rayların alt kısmını desteklemek için demiryolu hatlarının altına yerleştirilen bir bileşendir. Ray altı yastığı parçası çeşitli malzemeler kullanılarak 3B yazıcılar ile üretilmektedir. Van Schalkwyk ve Gräbe (2022) yaptıkları çalışmada, uygun maliyetli bir akıllı ray altı yastığı kullanarak tren tekerleklerinin durum izlemesini araştırmışlardır. Çalışmada, yaygın olarak bulunan ivmeölçerler ve bir gerinim ölçer ile gömülü bir 3B baskılı ray altı yastığı kullanan tren tekerleklerinin durumunun izlenmesine odaklanmışlardır. Akıllı ray altı yastığı için en uygun malzemeyi belirlemek üzere çeşitli 3B baskı malzemeleri (PLA, PETG ve TPU) üzerinde ve HDPE, Hytrel malzemeleri üzerinde bir dizi malzeme testi gerçekleştirilmiştir (Şekil 12) (Van Schalkwyk & Gräbe, 2022).



**Şekil 12.** Test Edilen Ray Altı Yastıklarının Ölçüleri (Van Schalkwyk & Gräbe, 2022).

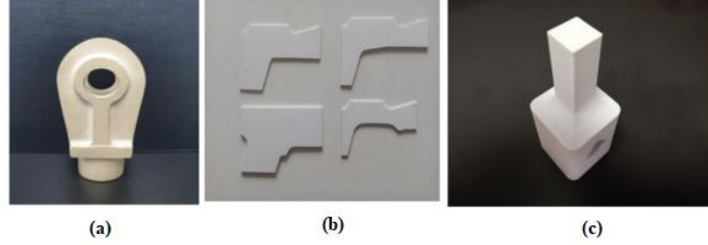
### Özel Parçalar

Eklemeli imalat ile demiryolu hatlarında kullanılan çeşitli özel parçalar (braket, elektrik hat kelepçesi, sensör, gösterge vb.) tasarlanarak üretilmiştir. 3B baskı teknolojisini kullanan akıllı demiryolu uygulaması için RFID tabanlı pilsiz sensör düğümü araştırılmıştır. RFID anteninde dielektrik mürekkepli PCB ve gümüş mürekkep olmak üzere iki farklı malzeme ile 3B baskı teknolojisi kullanılmıştır (Chim vd., 2019).

Lee ve Jung (2022) yaptıkları çalışmada, demiryolu elektrifikasyonunda havai hat bileşenleri için 3B baskı teknolojisi kullanılarak üretim sürecinin iyileştirilmesini araştırmışlardır. Çalışmada, 3B baskı teknolojisi kullanılarak havai hat bileşenleri için bir üretim süreci önerilmiştir. Bunun için yüksek hızlı demiryolu için klevis uç kelepçesi seçilmiş ve 3B tarama ile tasarım çizimi oluşturulmuştur. Kalıplar, kum kalıba döküm için bağlayıcı püskürtme 3B yazıcı yöntemi, hassas döküm için ise SLA (Stereolitografi) yöntemi kullanılarak eklemeli imalat teknolojisiyle üretilmiştir (Şekil 13a). 3B baskı kullanılarak kum kalıpla üretilen kelepçenin boyutlarının ölçüm değerleri, kurutma işlemi ve hacim azalması nedeniyle 3B modele göre daha düşük bulunmuştur. Ancak 3B baskı kullanarak izin verilen hata aralığında hızlı bir şekilde kelepçeler üretmenin mümkün olduğu belirtilmiştir (Lee & Jung, 2022).

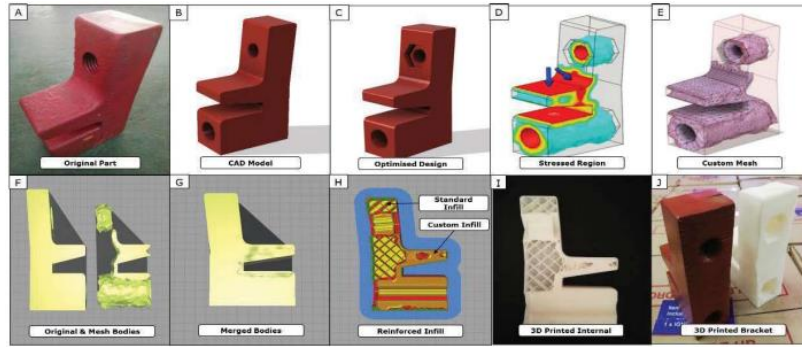
Kalibrasyon göstergeleri, bakım faaliyetleri gerçekleştirilirken demiryolu altyapısında yaygın olarak kullanılır. Gösterge, profili eski haline getirmek için taşlama müdahalelerinin gerekli olup olmadığı konusunda yol personelini bilgilendirir. Katmanlı üretim, tasarım mühendislerinin, yol bakım faaliyetlerine yardımcı olmak için talep üzerine bu göstergeleri yeniden üretmelerine olanak tanır (Şekil 13b) (Toth vd., 2022).

Ray kenarı ekipmanı, demiryolu altyapı varlıklarının izlenmesini ve bozulmaya karşı korunmasını sağlamak için kullanılır. Yol kenarı yağlayıcıları gibi yol kenarı ekipmanları, trenler geçerken ray üzerinde bir gres tabakası sağlar. Bu sayede aşırı aşınma önlenir. Eriyik biriktirme modelleme teknolojisi, etkili kalibrasyon için özel aletler, yedek parçalar ve ölçüm göstergeleri oluşturmak için kullanılır. Bakım amacıyla mekanik yağlayıcıyı açmak için özel olarak tasarlanmış bir alet Şekil 13c’de gösterilmiştir (Toth vd., 2022).



Şekil 13. a. Döküm Kelepçe (Lee & Jung, 2022) b. Ray Profili Göstergesi c. Yağlayıcı Bakım Takımı (Toth vd., 2022).

Toth ve Vilakazi (2019) yaptıkları çalışmada, demiryolu altyapı ortamında mekanik tasarıma yardımcı olmak için 3B baskılı parçalarda güçlendirilmiş mesh ve malzeme testinin faydalarını araştırmışlardır. Ayrıca vaka çalışmasında, optimal olarak 3B yazdırılmış bir gres plakası braketini özel olarak oluşturulmuş takviyeli bir dolgu geometrisi oluşturma teknikleri ve yöntemleri gösterilmiştir. Gres plakası braketini, demiryolunda yol kenarındaki yağlayıcı parçası olarak kullanılmakta olduğu belirtilmiştir. 3B baskılı optimize edilmiş yağ plakası braketinin vaka incelemesi sonucunda, özel bir dolgu geometrisi oluşturmanın 3B baskılı parçanın, reel uygulamalar için güçlendirilmesine yardımcı olabileceğini göstermiştir (Şekil 14) (Toth & Vilakazi, 2019).



Şekil 14. Özel Güçlendirilmiş Dolgu Geometrisi Kullanarak Yol Kenarı Yağlayıcı Braketini 3B Yazdırma (Toth & Vilakazi, 2019).

### Demiryolu Altyapısında Eklemeli İmalatın Kullanımı

Üç boyutlu baskı beton teknolojisi, 3 boyutlu baskılı sivil binalar ve köprüler gibi büyük 3 boyutlu baskılı yapılara izin verir, ancak baskı ekipmanının sahaya yerleştirilmesi gerekmektedir. 3B baskılı evlerin ve köprülerin arsa alanları yüzlerce metrekare mertebesinde olup, şantiye daha çok şehir merkezinde levha zeminler üzerine kuruludur. Bu altyapılardan farklı olarak, demiryolu hatlarının uzunluğu çok daha fazladır ve demiryolu altyapısının çoğu dağ tünellerinde, yer altı tünellerinde, köprülerde ve açık banliyölerde bulunur. Saha koşulları, 3B baskı makinelerinin hazırlanmasını ve yerleştirilmesini zorlaştırmaktadır (Fu & Kaewunruen, 2022).

Pan vd., (2021) yaptıkları çalışmada, inşaatta 3B baskının son teknoloji ve uygulamalarını araştırmışlardır. İnşaatta 3B baskının en son teknolojiye uyarlanmasının genel bir haritası sunulmuş ve hem teknik hem de teknik olmayan bakış açılarından teknolojinin hazırlığı değerlendirilmiştir. Çalışmada, Sincan'ın başkenti Wulumuqi'deki yüksek hızlı tren istasyonunun meydanında yer alan dört benzersiz şekilli yapının, 3B baskı ile yapılan çelikte güçlendirilmiş beton levhalardan meydana geldiği ifade edilmiştir. Ayrıca, 3B baskının inşaat uygulamalarında kullanımı hakkında çeşitli proje örnekleri de verilmiştir (Pan vd., 2021).

### Köprü, İstinat Duvarı ve Menfez

Yapılan araştırmalarda, eklemeli imalat ile üretilen köprü ve istinat duvarı gibi altyapı elemanlarının genellikle karayolları için üretildiği görülmektedir. Salet vd. (2018) yaptıkları çalışmada, “test ederek tasarım” konseptini uygulayarak 3B baskılı beton köprü yapmışlardır. Hem yapısal hem de inşaat açısından kapsamlı bir test prosedürü

takip edilmiştir. Olası sorunları ve tehlikeleri belirlemek için montaj denemeleri yapılmıştır. Çalışmada, bir kamu trafik ağında güçlendirilmiş bir 3B beton baskılı köprüsünü gerçekleştirirken karşılaşılan zorlukları ve bunların üstesinden gelmek için alınan çözümleri bütünsel olarak tartışmışlardır (Salet vd., 2018).

İncelenen araştırmalarda eklemeli imalat ile karayolları veya yaya yolları için ufak boyutlara sahip köprüler yapılabildiği görülmektedir. Demiryolları için ise eklemeli imalat boyutsal sınırlar ve üretim yeri gibi sebeplerden dolayı köprü üretiminin zor olduğu görülmektedir. Feucht vd. (2021) yaptıkları çalışmada, çelikle 3B baskı: bir köprünün yerinde eklemeli imalatını araştırmışlardır. Çalışmada, TU Darmstadt'ta tel ve ark tabanlı bir eklemeli üretim süreci kullanılarak çelikten yerinde 3 boyutlu bir yaya köprüsü yazdırılmıştır (Şekil 15a). Bu projeye dayanarak, büyük çelik yapıların yerinde eklemeli imalatının mümkün olduğu gösterilmiştir (Feucht vd., 2021).

Ancak gelişen teknoloji ile birlikte eklemeli imalat yöntemiyle daha dayanıklı ve büyük boyutlu köprüler yapılabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, eklemeli imalat ile üretilen beton bloklarının demiryolları için köprü yapımında da kullanılabileceği düşünülmektedir.

Demiryolu altyapı elemanlarından biri olan menfezler demiryolları için çok önemlidir. Menfez, demiryolu hatları ile yol trafiğini ve diğer ulaşım sistemlerini güvenli tutmak ve etkileşimleri kontrol etmek için kullanılmaktadır. Son yıllardaki çalışmalarda bu yapıların eklemeli imalat ile üretilebildiği görülmektedir. Şekil 15b'de eklemeli imalat ile üretilen menfeze sahip istinat duvarı gösterilmektedir. Ayrıca eklemeli imalat ile beton bloklarının üretimi sayesinde bu blokların istinat duvarı olarak demiryollarında da kullanılabileceği öngörülmektedir.

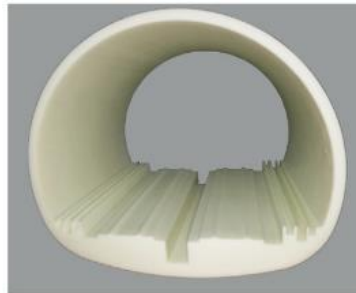


Şekil 15. a. 3B Yazdırılan Çelik Köprü (Feucht vd., 2021) b. 3B Baskı İle Üretilen Menfezli İstinat Duvarı (Cambridge Üniversitesi, t.y.).

### Tünel

Tünellerin inşaatının, üretim yeri sınırları ve yüksek maliyetli olması sebebiyle eklemeli imalat ile üretiminin zor olduğu görülmektedir. Ancak, çeşitli drenaj, rüzgar vb. testleri için FDM eklemeli imalat teknolojisi ile prototip mini tüneller üretilerek çeşitli analizler yapılabilmektedir.

Li vd., (2022) yaptıkları çalışmada, 3B baskı teknolojisi kullanılarak farklı drenaj sistemleriyle çalışan demiryolu tünellerinin invert stabilitesini deneysel olarak incelemişlerdir. Son yıllarda, su zengini bölgelerde demiryolu tünellerinin işletilmesinde ters anomaliler sıklıkla ortaya çıkmakta ve bu durum demiryolu hatlarının taşıma kapasitesini büyük ölçüde etkilemektedir. Tünel drenaj sistemi, harici su basıncını düzenleyerek ters stabilizeyi sağlamak için çok önemli bir faktördür. Çalışmada, üç boyutlu (3B) bir baskı modeli aracılığıyla, Çin'de yaygın olarak kullanılan geleneksel drenaj sistemi (TDS) ve alttan drenaj işlevine sahip optimize edilmiş drenaj sistemi (ODS) ile tüneller için invert deformasyon davranışını deneysel olarak araştırmışlardır (Şekil 16) (Li vd., 2022).

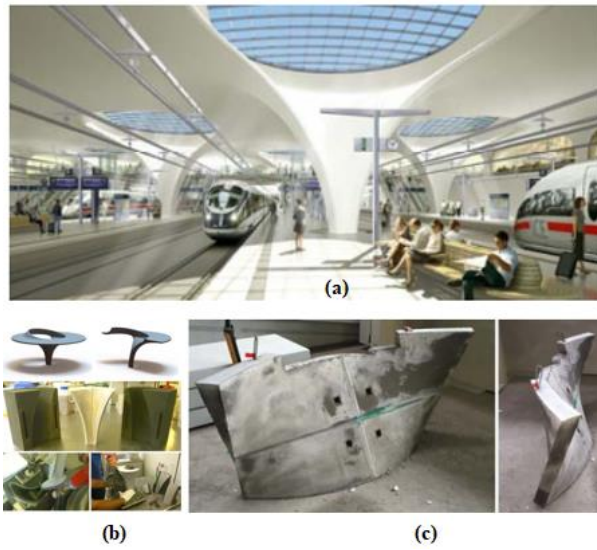


Şekil 16. 3B Baskılı Tünel Yapı Modeli (Li vd., 2022).

## İstasyon

Tren istasyonlarının inşaatının eklemeli imalat ile üretimi ise karmaşık ve yüksek maliyetli olmasına rağmen Alman demiryolu şirketinin projesi kapsamında hedeflenmektedir. Proje kapsamında, 3B yazıcılarla beton blokları ve diğer kısımlarının üretimi ve daha sonra bu parçaların birleştirilmesi ile tren istasyonu üretimi amaçlanmaktadır.

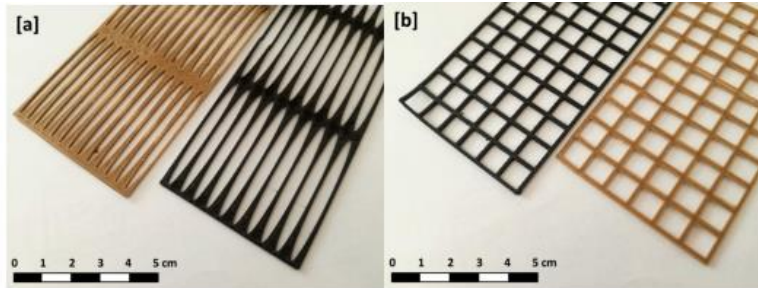
Teizer vd., (2016) yaptıkları çalışmada, inşaatta karmaşık geometrik şekillerin büyük ölçekli 3B baskısını incelemiştir. Çalışmada, “Stuttgart 21” ana merkez tren istasyonu inşaat projesinin tasarımından ve öneminden bahsedilmiştir. İstasyon tasarımında, optimize edilmiş kabuk yapısının, yani karmaşık parabolik beton kolonların kalınlığı, açıklığın yüzde birine düşürülerek inşaat için çok daha az malzeme kullanılması sağlanmıştır. Yaptıkları çalışmada, küçük ve büyük ölçekli test modelleri oluşturulmuştur. Küçük ölçekli test de kolonun basitleştirilmiş bir 3B modeli oluşturulmuş ve iki kum kalıp parçasına bölünmüştür. Sonrasında bir kalıp sistemi olarak işlev görecektir şekilde birleştirilmiş ve beton kalıplara dökülerek kalıp çıkarılmış ve ürün oluşturulmuştur. Büyük ölçekli test ise, ana istasyondaki bir parabolik beton kolonun ayrıntılı eleman ve kalıp tasarımının yanı sıra inşa edilebilirlik planlaması şeklinde oluşturulmuştur (Şekil 17) (Teizer vd., 2016).



Şekil 17. a. Parabolik Beton Kolonlu “Stuttgart 21” Ana İstasyonu Tasarımı b. Parabolik Beton Kolonun Küçük Ölçekli Üretimi c. 3B Baskılı Kalıp Elemanlarının Çıkarılmasından Sonra Beton (Teizer vd., 2016).

## Ses Bariyerleri ve Georidler

Demiryolu hattı altyapısında gürültüyü azaltmak için ses bariyerleri bileşenleri bulunmaktadır. Ses bariyerleri raylı sistem araçlarının hareketi sırasında oluşan gürültü sorununu ortadan kaldırmak için önemli bir parçadır. Ayrıca, balast etkileşimini artırmak için georidler, balast hareketini kısıtlamak için istinat duvarları ve kumları bloke etmek için kum koruma duvarları gibi sahalardaki belirli sorunları ele almak için demiryolu hattı altyapısı bazı özel bileşenler içerir (Fu & Kaewunruen, 2022). Balast etkileşimini artırmak için kullanılan georidler farklı malzeme ve tasarımlarla 3B yazıcılar ile üretilebilmektedir (Şekil 18).



Şekil 18. n-PLA (Siyah) ve h-PLA (Kahverengi) 3B Baskı İle Üretilen Georidler a. Tek Eksenli Georid, b. İki Eksenli Georid (Cislaghi vd., 2021).

Demiryollarında raylı sistem araçlarından, yüksek hızda ve ray-tekerlek teması gibi durumlardan dolayı gürültü oluşmaktadır. Bu sebeple demiryollarında gürültünün azaltılması için ses bariyerlerinin tasarımı önem

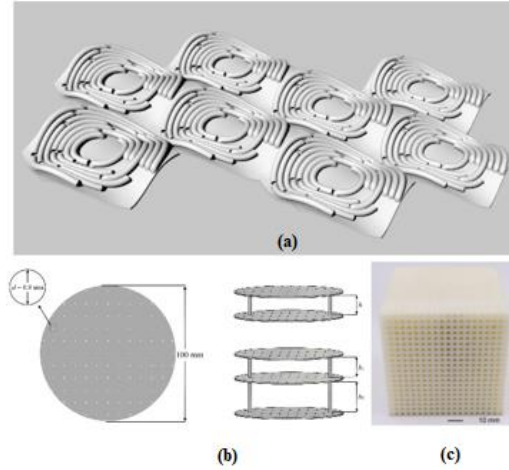
kazanmaktadır. Eklemeli imalat ile karmaşık geometrilere sahip parçaların üretilmesi mümkündür. Ses bariyerlerinin tasarımı, optimum gürültü azaltmanın sağlanması için karmaşık geometriye sahip olabilmesi sebebiyle eklemeli imalat ile üretimi avantaj sağlamaktadır.

3B baskılı ses bariyerinin gürültüyü yaklaşık 30 dB kadar etkili bir şekilde azaltabileceği ve gürültü azaltma etkisinin geleneksel teknolojiyi kullanan ses bariyerinden daha belirgin olduğu tahmin edilmektedir (Şekil 19) (WinSun, t.y.).



Şekil 19. Ses Bariyerleri (WinSun, t.y.).

Trafik akışının yoğun olduğu hem demiryollarında hem de karayollarında gürültü problemini ortadan kaldırmak için 3B yazıcı ile çeşitli ses bariyerleri tasarımları ve üretimleri gerçekleştirilmektedir (Şekil 20). Günümüzde ses bariyerlerinin kullanımının artan trafik yoğunluğu ile birlikte arttığı görülmektedir.



Şekil 20. a. 3B Yazıcıda Üretilmiş Gürültü Emiciler (Setaki vd., 2023) b. Gürültü Emme Optimizasyonu İçin 3B Yazıcıda Üretilen Mikro Delikli Panelin Şematik Gösterimi (Yang vd., 2020) c. 3B Yazıcıda Üretilmiş 20 Tüp Ağ Katmanına Sahip Ses Emici (Zhao vd., 2021).

### Raylı Sistem Araçlarında Eklemeli İmalatın Kullanımı

Çeken ve çekilen araçları oluşturan parçalarının bir kısmının eklemeli imalat ile üretilmiş olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, raylı sistem araçları birçok parçadan oluştuğu için eklemeli imalat ile üretilen tren ve vagon parçalarını tek tek açıklamaktan ziyade raylı sistem araçlarını oluşturan parçaların üretiminde eklemeli imalatın hangi amaçlarla kullanıldığı araştırılarak ifade edilmiştir. Eklemeli imalat raylı sistem araçlarında genellikle; prototip parça üretimi, yedek parça üretimi, karmaşık kafes yapı tasarımı, parça basitleştirme, kalıp üretimi ve parça tamiri gibi amaçlarla kullanılmaktadır.

Killen vd., (2018) yaptıkları çalışmada, iç ray bileşenlerinin tasarımına, imalatına ve bakımına alternatif bir yaklaşım sunarak eklemeli imalat kullanımının keşfedilmesini araştırmışlardır. Çalışmada, Alman Demiryolları'nın, artık büyük ölçekli üretimde olmayan, ICE yüksek hızlı trenlerinin ilk nesilleri olan eski filoları için 3B baskılı parçalara sahip olduğu belirtilmiştir. Eski filolardaki parçaların değiştirilmesi, artık üretilmeyebilecekleri ve bu nedenle geleneksel üretim teknikleri kullanılarak yeniden üretilmesi pahalı olabileceğinden, pahalı ve karmaşık bir süreç olabilmektedir. Eklemeli imalat, artık üretilmeyen parçalar için takım veya kalıp üretiminin ön maliyetini de ortadan kaldırmaktadır. Eklemeli imalatın kullanımı, Alman Demiryolları ağında ve filusunda tasarım güncellemelerini prototipleme ve deneme için de kullanılmıştır. Havalandırma menfezleri ve yatay damper konsolları gibi mühendislik parçaları eklemeli imalat kullanılarak basılmıştır. Bölgesel demiryolu filosu koltukları için yeni koltuk

başlıkları ve tirabzanlarda görme engelliler Braille tabelası gibi müşteri etkileşimini içeren tasarım parçaları da basılmıştır (Killen vd., 2018).

### **Yedek Parça Üretimi**

Yıllar önce üretilen ürünlerin yedek parçaların günümüzde bulunması zor olabilmektedir. Bu sebeple hasarlı parçaların hızlı ve ucuz bir şekilde değiştirilebilmesi için yedek parçaların eklemeli imalat ile üretimi önemlidir. Ayrıca, günümüzde üretilen özel tasarım parçaların hızlı bir şekilde temin edilmesinin gerektiği durumlarda da 3B yazıcılar ile parça üretimi sağlanabilmektedir.

Hohenwarter vd., (2020) yaptıkları çalışmada, polikarbonat (PC) ve poliaktik asit (PLA) kullanımının demiryolu uygulamalarında yanıcılık özelliklerine 3B baskının etkisini incelemişleridir. Çalışmada, 3B baskı yoluyla Polikarbonat polimerinden yapılmış şeffaf bileşenlerin üretimine odaklanmıştır. Sınırlı üretim sayıları nedeniyle, demiryolu bileşenlerinin üretiminde katmanlı imalat kullanılmasının daha ekonomik olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada polimer, farklı alev geciktirici maddeler kullanılarak modifiye edilmiş ve baskı parametrelerinin, özellikle de baskı yoğunluğunun etkisi belirlenmiştir. Çeşitli uygulamalar için farklı boyutlarda LED armatürün 3B basılmış uç kapaklarının görseli Şekil 21a'da verilmiştir (Hohenwarter vd., 2020).

Eklemeli imalatın demiryolu endüstrisindeki diğer bir avantajı da, talep üzerine iş bağlama düzenini oluşturan aparatlar gibi yardımcıları üretebilme yeteneğidir. Şekil 21b'de tren boji bakımında kullanılan birincil bağlantı aracı bir eklemeli imalat işlemiyle üretilmiştir (Wu vd., 2023).



**Şekil 21. a.** Demiryolu Araçlarında LED Armatürlerin 3B Basılmış Plastik Uç Kapakları (Hohenwarter vd., 2020)  
**b.** Bir Trende Eklemeli İmalatlı Boji Konnektörü (Wu vd., 2023).

Toth vd., (2022) yaptıkları çalışmada, nihai fonksiyonel demiryolu aracı tavan hava girişi ve havalandırma yedek parçalarının eriyik biriktirme modelleme teknolojisi ile üretilmiştir. Ayrıca, eriyik biriktirme modelleme teknolojisi, enjeksiyonla kalıplanmış bileşenleri güçlendirmek için bazı tasarım öğeleri eklerken dişli mekanizmaları için yeni yedek plastik kapaklar oluşturmak için kullanılmıştır. Eklemeli imalat teknolojisinin kullanılması, daha önce enjeksiyonla kalıplanmış tek seferlik değiştirmelerin oluşturulması için daha ucuz ve daha hızlı bir yöntem sağladığı belirtilmiştir. Bu çalışma ile 3B baskı teknolojisinin demiryolu ile ilgili uygulamaların eski bileşenleri için yeni ve optimize edilmiş yedek parçalar oluşturabileceğini göstermiştir (Toth vd., 2022).

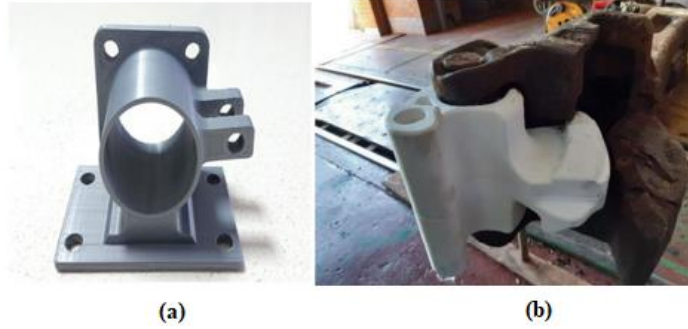
### **Parça Basitleştirme ve Prototip Üretimi**

Karmaşık bileşenler genellikle kaynaklama, cıvatalama, sert lehimleme vb. yöntemlerle birleştirilen çok sayıda basit parçadan oluşur. Ancak, tek bir parçayla karşılaştırıldığında, bu tür tertibatlar daha düşük performans sergilemekte ve daha yüksek muayene ve bakım maliyetleri içermektedir. Eklemeli imalat teknolojileri, parçanın performansını artırarak ve daha hafif bir yapı oluşturarak toplam parça sayısını azaltabilir (Wu vd., 2023).

Parça sayısını azaltmak için uygulanabilir bir yaklaşım, imal edilen parça sayısını azaltan montaj-parça konsolidasyonudur. Metal ve polimer eklemeli imalat teknolojilerinin avantajlarından yararlanarak ve eklemeli imalat için tasarım tekniklerini uygulayarak, montaj-parça birleştirilmiş demiryolu ürünlerinin yeni tasarımları üretilir. Demiryolu inceleme aracında bulunan mevcut tekerlek yatağı süspansiyon muhafazası, tek bir düzenek oluşturmak için dokuz ayrı parçanın kullanıldığı geleneksel yöntemler kullanılarak üretilmiştir. Eklemeli imalat için tasarım teknikleri ve eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak, tekerlek yatağı süspansiyon muhafazası prototipi, minimum destek yapıları gerektiren yazdırılabilir tek bir konsolide nesne olarak tasarlanmış ve eklemeli imalat teknolojisi ile prototip üretilmiştir (Şekil 22a) (Toth vd., 2022).

Hoosain vd., (2020) yaptıkları çalışmada, demiryolu endüstrisinde eklemeli imalat ile ilgili vaka çalışması incelemişlerdir. Vaka çalışmasında, iki vagonu birbirine bağlamak için kullanılan ve sistemin parçası olan mafsalın

ağırlığı optimize edilerek SLS eklemeli imalat yöntemiyle bir prototip üretilmiştir (Şekil 22b). Yapılan çalışmanın, temel işlevselliği etkilemeden çok daha hafif bir parça tasarlanmasının mümkün olduğunu ve üretim kısıtlamaları dikkate alınarak kullanılabilir bir parçanın üretilebilmesini sağlamak için hâlâ bir miktar tasarım iyileştirmesinin gerekli olduğunu kanıtlamak için yapıldığı ifade edilmiştir (Hoosain vd., 2020).



Şekil 22. a. 3B Baskılı Prototip (Toth vd., 2022) b. Mafsal Prototip Üretimi (Hoosain vd., 2020).

Wang vd., (2022) yaptıkları çalışmada, yüksek hızlı demiryolu fren diskleri için 3B baskı dıştan olarak güçlendirilmiş katmanlar: SLM işlemlerinin gradyan malzemelerinin üretimi için uyarlanabilirliğini araştırmışlardır. Yüksek hızlı demiryolu fren diski için yarı sürekli oranlı gradyan alaşımlı çelik, seçici lazer eritme (SLM) ile hazırlanmıştır. Kendi tasarladığı bileşime sahip aşınmaya dayanıklı paslanmaz çelik, dış güçlendirme katmanı olarak kullanılmıştır. Gradyan alaşımlı çelik numunesi, gradyanlar arasında iyi bir metalurjik bağa sahip olduğu ve bileşimin eşit şekilde değiştiği; bunun, daha sonraki aşınma direnci ve korozyon direnci analizi için iyi bir temel oluşturacağı belirtilmiştir (Wang vd., 2022).

### ***Karmaşık Kafes Yapı Üretimi***

Eklemeli imalat teknolojisi, kafes yapılarının topoloji için optimize edilmiş yapılarda kullanılmasını sağlamaktadır. Geleneksel katı yapılarla karşılaştırıldığında, kafes yapılar, daha yüksek özgül güç ve özgül sertlik, aynı zamanda titreşim azaltma, gürültü azaltma ve darbe direnci sunan daha iyi malzeme kullanımı sunmaktadır. Nitekim hızlı tren gövde taban ve etek saclarında alüminyum petek paneller ve kompozit sandviç paneller kullanılmıştır. Bu bağlamda, eklemeli imalat teknolojisinin sunduğu yüksek derecede tasarım özgürlüğü, kafes yapılardan yararlanma olanaklarını önemli ölçüde genişletir (Wu vd., 2023).

### ***Parça Tamiri***

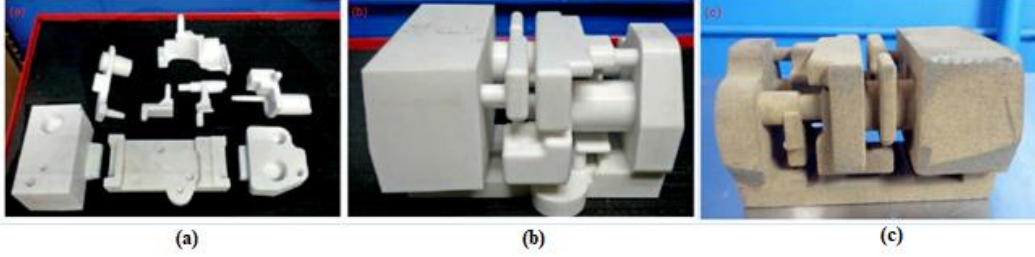
Demiryollarında rayların eklemeli imalat ile tamir edildiği gibi çeken ve çekilen araçları oluşturan parçaların da eklemeli imalat ile tamiri de mümkündür. Demiryolu dingillerinin montajı, boşaltılması, işletilmesi ve bakımı sırasında tekerlek yuvaları, dişli yuvaları, dingil kirişleri ve dingillerin diğer parçaları çizilmelere, eziklere ve aşınmaya maruz kalır. Hasarın göz ardı edilmesi, raydan çıkma da dahil olmak üzere tren operasyonlarının güvenliği için yakın bir tehdit oluşturan akslarda yorulma arızasına yol açabilir. Hasar derinliği belirli bir değeri aşarsa dingil hurdaya ayrılır. Bu nedenle, hasarlı dingilleri onarmak için dingil yenileme teknolojisinin geliştirilmesi demiryolu işletme maliyetlerini azaltabilir ve kaynak kullanımını iyileştirebilir (Wu vd., 2023). Bu sebeple hasarlı dingilleri tamir için lazer kaplama prosesi uygulanabilmektedir.

### ***Kalıp Üretimi***

Demiryolu dingil kutuları için muhafazalar ve kapaklar gibi öğeler genellikle kum döküm kullanılarak üretilmektedir. Eklemeli imalat, özellikle prototiplerin ve alet parçalarının üretimi için çok uygundur (Wu vd., 2023). Özellikle karmaşık geometriye sahip ters açılı parçaların üretimi geleneksel kum kalıpta döküm yöntemi ile üretimi zordur. Bu sebeple bu tür parçaların dökümü için eklemeli imalat ile kum kalıpların üretilmesi gerekmektedir.

Kang ve Ma (2017) yaptıkları çalışmada, 3B baskı teknolojilerinin dökümdeki rolü ve etkisini araştırmışlardır. Çalışmada, bir trenin hava freni için geleneksel olarak sekiz farklı çekirdekten dönüştürülen tek bir çekirdek gibi, fırınlanmayan veya soğuk kutu sistemlerindeki çoklu çekirdekler, azaltılmış istifleme toleransları ve iyileştirilmiş boyutsal doğrulukla bir 3B yazıcıyla tek bir parça halinde basıldığı belirtilmiştir (Şekil 23a-23b). Çalışma sonunda, 3B baskı teknolojilerinin, hızlı prototiplemeden hızlı kalıplamaya, hızlı üretime ve hızlı döküme doğru geliştiği ifade edilmiştir. Ayrıca, katmanlı üretim yönteminin, tasarımcılara çok daha fazla tasarım özgürlüğü sağlamanın yanı sıra yüksek verimlilik ve daha düşük maliyet sağladığı belirtilmiştir (Kang & Ma, 2017).

Almaghariz vd., (2016) yaptıkları çalışmada, kalıplar ve maçalar için 3B kum baskı kullanımında parça tasarımı karmaşıklığının rolünün belirlenmesini araştırmışlardır. Bu çalışmada, parça tasarımı karmaşıklığına ve bunun çeşitli üretim hacimleriyle ilişkisine dayalı olarak 3 boyutlu kum baskısının ekonomik fizibilitesi için karar kriterleri geliştirilmiş ve vaka çalışmaları kullanılarak gösterilmiştir. Vaka çalışması olarak tren hava freni ve turboşarj parçaları incelenmiştir. Kompleks şekilli tren hava freninin dökümü için 3B kum baskılı maça görseli verilmiştir (Şekil 23c) (Almaghariz vd., 2016).



**Şekil 23. a.** Soğuk Kutu Maça, Sekiz Farklı Parça, **b.** 3B Baskı İle Maça, Tek Parça (Hava Freni Dökümü İçin Maçaların Tek Bir Parça Halinde Entegrasyonu) (Kang & Ma, 2017) **c.** Tren Hava Freninin Dökümü İçin 3B Kum Baskılı Maça (Almaghariz vd., 2016).

## SONUÇLAR

Bu çalışmada eklemeli imalat yönteminin tanımı yapılarak avantajları ve dezavantajları ifade edilmiştir. Günümüzde demiryolu endüstrisinde eklemeli imalatın hangi alanlarda kullanıldığı belirtilerek demiryolu endüstrisinde kullanımının artırılıp artırılmayacağı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma sonucunda, demiryolu endüstrisinde birçok alanda eklemeli imalatın direkt veya dolaylı olarak kullanıldığı görülmektedir. Ancak gelişen teknoloji ile birlikte eklemeli imalat yönteminde kullanılan malzeme çeşidinin çoğalması, üretim hızının ve üretim kalitesinin artması sebebiyle eklemeli imalatın ilerleyen zamanlarda demiryolu endüstrisinde kullanımının daha yaygınlaşacağı düşünülmektedir. Yüksek dayanım, hafif tasarım, düşük maliyetli üretim ve tasarım özgürlüğü gibi avantajlar sayesinde eklemeli imalatın modern üretim yöntemleri arasında özellikle tasarım, yedek parça üretimi, tamir ve optimizasyon açısından öne çıkmaktadır. Metal eklemeli imalat teknolojisinin gelişmesiyle birlikte direkt parça üretiminin de kolaylaşması raylı sistemlerde kullanılan metal parçaların üretimi için de önemli bir avantajdır. Bu çalışma ile demiryolu endüstrisinde eklemeli imalatın kullanıldığı alanlar açıklanarak akıllı demiryolu hattı inşa edebilmek için eklemeli imalatın benimsenmesi ve kullanım potansiyelinin artırılması sağlanmaya çalışılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Almaghariz, E. S., Conner, B. P., Lenner, L., Gullapalli, R., Manogharan, G. P., Lamoncha, B., & Fang, M. (2016). Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores. *International Journal of Metalcasting*, 10(3), 240-252. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0027-5>
- Arlı, V. (2002). Balastlı ve Balastsız Üstyapıların Ekonomik Yönden Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul
- Ayyıldız, R., & Eyigün, Y. (2020). Raylı Sistem Araçlarının Yerileştirilmesi. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(1), 107-120.
- Başcı, Ü. G., & Yamanoğlu, R. (2021). Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: FDM ile Eklemeli İmalat. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(2), 339-352. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.838281>
- Bilgiç, Ş. (2017). *Demiryolu*. OGÜ, Ders Notu. <https://web.ogu.edu.tr/Storage/akalin/Uploads/demiryolu-dersnotu-1-2017.pdf> Erişim 01.06.2023
- Bozkurt, Y., Gülsoy, H., & Karayel, E. (2021). Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.31202/ecjse.902023>
- Broekman, A., & Gräbe, P. J. (2021). Development of virtual environments for deep learning railway applications. *SAHHA Technical Conference 2021 Proceedings*.



Cambridge Üniversitesi. (2023). 3B beton istinat duvarı ve menfez. <http://www.eng.cam.ac.uk/news/cambridge-researchers-help-develop-smart-3d-printed-concrete-wall-national-highways-project> Erişim 21.08.2023,

Chen, S.-E., Shanmugam, N. S., Boyajian, D., Chavan, V. S., Weber, E., & Baarsons, K. (2021). Prototyping rail track for micro-people movers using additive manufacturing: Failure topology characterization. *Construction and Building Materials*, 281, 122623. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122623>

Chim, Y. Y., Leung, M. H. F., Ni, Y. Q., & Tsang, E. C. L. (2019). RFID Based Battery-Free Sensor Node for Smart Railway Application using 3D-Printing Technology. *2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems (FLEPS)*, 1-3. <https://doi.org/10.1109/FLEPS.2019.8792251>

Cislaghi, A., Sala, P., Borgonovo, G., Gandolfi, C., & Bischetti, G. B. (2021). Towards More Sustainable Materials for Geo-Environmental Engineering: The Case of Geogrids. *Sustainability*, 13(5), 2585. <https://doi.org/10.3390/su13052585>

Çeçen, F., & Aktaş, B. (2021). Yeni Nesil Demiryolu Traversleri ve Yerli FRP Donatı Kullanımının Deneysel Araştırması. *Demiryolu Mühendisliği*, 13, 53-64. <https://doi.org/10.47072/demiryolu.803452>

Çelebi, A., & Koda, Y. (2021). Endüstri 4.0 Çerçevesinde Katmanlı İmalatta Sensör Uygulamaları. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 5(1), 85-97. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.837635>

Fereshtenejad, S., & Song, J.-J. (2016). Fundamental Study on Applicability of Powder-Based 3D Printer for Physical Modeling in Rock Mechanics. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(6), 2065-2074. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0904-x>

Feucht, T., Waldschmitt, B., Lange, J., & Erven, M. (2021). 3D-Printing with Steel: Additive Manufacturing of a Bridge in situ. *Ce/Papers*, 4(2-4), 1695-1701. <https://doi.org/10.1002/cepa.1475>

Fu, H., & Kaewunruen, S. (2022). State-of-the-Art Review on Additive Manufacturing Technology in Railway Infrastructure Systems. *Journal of Composites Science*, 6(1), 7. <https://doi.org/10.3390/jcs6010007>

Gündüz, A. Y., Kaya, M., & Aydemir, C. (2011). Kentiçi Ulaşımında Karayolu Ulaşımına Alternatif Sistem: Raylı Ulaşım Sistemi. *Akademik Yaklaşımlar Dergisi*, 2(1), 134-151.

Hohenwarter, D., Fischer, C., & Berger, M. (2020). Influence of 3D-Printing on the Flammability Properties of Railway Applications Using Polycarbonate (PC) and Polylactic acid (PLA). *Problemy Kolejnictwa - Railway Reports*, 64(187), 99-107. <https://doi.org/10.36137/1874E>

Hoosain, S. E., Tshabalala, L., Bester, D., Chetty, D., & Mukwevho, G. (2020). Additive manufacturing case study in the railway industry. *Proceedings of the Rapid Product Development Association of South Africa (RAPDASA)*, 80-86.

Kabasakal, A., & Solak, A. O. (2009). Demiryolu Sektörünün Rekabete Açılması. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 25.

Kang, J., & Ma, Q. (2017). The role and impact of 3D printing technologies in casting. *China Foundry*, 14(3), 157-168. <https://doi.org/10.1007/s41230-017-6109-z>

Killen, A., Fu, L., Coxon, S., & Napper, R. (2018). Exploring the use of Additive Manufacturing in Providing an Alternative Approach to the Design, Manufacture and Maintenance of Interior Rail Components. *Australasian Transport Research Forum 2018 Proceedings*, 30.

Lai, Q., Abrahams, R., Yan, W., Qiu, C., Mutton, P., Paradowska, A., Soodi, M., & Wu, X. (2019). Influences of depositing materials, processing parameters and heating conditions on material characteristics of laser-cladded hypereutectoid rails. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.035>

- Lee, K., & Jung, H. (2022). An improvement of manufacturing process using 3D printing technology for overhead line components on railway electrification. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 17(5), 3085-3091. <https://doi.org/10.1007/s42835-022-01209-w>
- Li, L., Yang, J., Fu, J., Wang, S., Zhang, C., & Xiang, M. (2022). Experimental investigation on the invert stability of operating railway tunnels with different drainage systems using 3D printing technology. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(5), 1470-1485. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.12.013>
- Liu, S., Huang, H., Qiu, T., & Kerchof, B. (2019). Characterization of Ballast Particle Movement at Mud Spot. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(1), 04018339. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002545](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002545)
- Liu, S., Huang, H., Qiu, T., & Kwon, J. (2017). Comparative Evaluation of Particle Movement in a Ballast Track Structure Stabilized with Biaxial and Multiaxial Geogrids. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2607(1), 15-23. <https://doi.org/10.3141/2607-04>
- Mortazavian, E. (2022). Mobile 3D Printing of Rail Track Surface For Rapid Repair. Ph.D. Thesis. University of Nevada Department of Mechanical Engineering, Las Vegas.
- Nellian, A. S., & Pang, J. H. L. (2023). Laser metal deposition characterization study of metal additive manufacturing repair of rail steel specimens. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1), e2134042. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2134042>
- Özsolak, O. (2019). Eklemeli İmalat Yöntemleri ve Kullanılan Malzemeler. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3(1), 9-14.
- Özsoy, K., & Duman, B. (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.
- Pan, Y., Zhang, Y., Zhang, D., & Song, Y. (2021). 3D printing in construction: State of the art and applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(5-6), 1329-1348. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07213-0>
- Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., & Laagland, H. L. M. (2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 222-236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>
- Saltık, O., & Özsoy, A. (2020). Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalatta Kullanılan Bağlayıcılar. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 3(1), 10-18.
- Setaki, F., Tian, F., Turrin, M., Tenpierik, M., Nijs, L., & Van Timmeren, A. (2023). 3D-printed sound absorbers: Compact and customisable at broadband frequencies. *Architecture, Structures and Construction*, 3(2), 205-215. <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00086-9>
- Sevi, M., Aydın, İ., & Karaköse, M. (2022). Derin Öğrenme Yöntemleri ile Demiryolu Bağlantı Elemanlarının Sınıflandırılması. *European Journal of Science and Technology*, 35, 268-274. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1029905>
- Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(2), 373-392. <https://doi.org/10.17482/uumfd.519147>
- Şen, M. (2023). Eklemeli İmalat Yöntemi ile Üretilen Parçaların Kaynakla Birleştirilmesi ve Analizi. Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul
- Tacıroğlu, M. V. (2016). Demiryolu Hat Oturmasının Matematiksel Modelleri ve Hat Oturmasına Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(3), 239-246. <https://doi.org/10.21923/jesd.49727>

Teizer, J., Blickle, A., King, T., Leitzbach, O., & Guenther, D. (2016, Temmuz 21). *Large Scale 3D Printing of Complex Geometric Shapes in Construction*. 33th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Auburn, AL, USA. <https://doi.org/10.22260/ISARC2016/0114>

Toth, A. D., Padayachee, J., Mahlatji, T., & Vilakazi, S. (2022). Report on case studies of additive manufacturing in the South African railway industry. *Scientific African*, 16, e01219. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01219>

Toth, A. D., & Vilakazi, S. (2019). Benefits of Reinforced Meshing and Materials Testing of 3D Printed Parts to Assist Mechanical Design In The Railway Infrastructure Environment. *RAPDASA 2019 Conference Proceedings*.

Van Schalkwyk, M. H., & Gräbe, P. J. (2022). Condition monitoring of train wheels using a cost-effective smart rail pad. *Engineering Research Express*, 4(3), 035045. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ac87ec>

Wang, X., Zhang, S., Wang, Z. Y., Zhang, C. H., Wu, C. L., & Wang, M. (2022). 3D printing externally reinforced layers for high-speed railway brake discs: Adaptability of SLM processes for manufacturing gradient materials. *Materials Today Communications*, 31, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103778>

WinSun (2023). 3B baskılı ses bariyerleri. [http://www.winsun3d.com/En/News/news\\_inner/id/569](http://www.winsun3d.com/En/News/news_inner/id/569) Erişim 31.07.2023

Wu, Z., Wu, S., Qian, W., Zhang, H., Zhu, H., Chen, Q., Zhang, Z., Guo, F., Wang, J., & Withers, P. J. (2023). Structural integrity issues of additively manufactured railway components: Progress and challenges. *Engineering Failure Analysis*, 149, 107265. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107265>

Yalçın, B., & Ergene, B. (2017). Endüstride Yeni Eğilim Olan 3-B Eklemeli İmalat Yöntemi ve Metalurjisi. *SDU International Journal of Technological Sciences*, 9(3), 65-88.

Yang, Bai, Zhu, Kiran, An, Chua, & Zhou. (2020). 3D Printing of Polymeric Multi-Layer Micro-Perforated Panels for Tunable Wideband Sound Absorption. *Polymers*, 12(2), 360. <https://doi.org/10.3390/polym12020360>

Yeşiloğlu, R. (2022). Eklemeli İmalat ile Üretilen Farklı Dolgu Geometrisi ve Yoğunluğa Sahip PLA Esaslı Yapıların Mekanik Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük

Yılmaz, A. (2015). Demiryolu Üstyapısında Balast Kirliliği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 6(1), 11-17.

Zeng, K., Qiu, T., Bian, X., Xiao, M., & Huang, H. (2019). Identification of ballast condition using SmartRock and pattern recognition. *Construction and Building Materials*, 221, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.049>

Zhao, T., Chen, Y., Zhang, K., & Hu, G. (2021). Tunable network sound absorber based on additive manufacturing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150(1), 94-101. <https://doi.org/10.1121/10.0005507>