

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİ İLE BAĞLANTI ELEMANI
ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selvi KADİROĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ömer SEÇGİN

Şubat 2025

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİ İLE BAĞLANTI
ELEMANI ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selvi KADİROĞLU

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 06/02/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

| JÜRİ | BAŞARI DURUMU |
|------------------------------------|---------------|
| Jüri Başkanı: Prof. Dr. Nuri Akkaş | Başarılı |
| Üye: Doç. Dr. Ömer Seçgin | Başarılı |
| Üye: Doç. Dr. Osman Hamdi Mete | Başarılı |

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Selvi KADİROĞLU

06/02/2025

TEŞEKKÜR

Almıő olduğum lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca bilgisini ve desteğini esirgemeyen, deneyimlerini ve tecrübelerini her koőulda bize aktaran, eğitimimle ilgili tüm süreçlerde bana yn gösteren değerli danıőman hocam Doç. Dr. Ömer SEGIN'e teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca daima beni maddi ve maneyi olarak destekleyen, motive eden bana yol gösteren aileme, yaőadığım süreçlerde benden desteğini esirgemeyen sevgili meslektaőım ve yakın arkadaőım Enes GENÇ'e teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

| | |
|-----------------------|------|
| TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| KISALTMALAR | iv |
| SİMGELER | v |
| TABLOLAR LİSTESİ..... | vii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | viii |
| ÖZET..... | x |
| ABSTRACT..... | xi |

BÖLÜM 1.

| | |
|---|---|
| GİRİŞ | 1 |
| 1.1. Tezin Amacı | 2 |
| 1.2. Literatür Araştırması | 2 |
| 1.3. Hipotez | 5 |
| 1.4. İmalat Yöntemleri | 6 |
| 1.4.1. Geleneksel üretim yöntemleri | 6 |
| 1.4.2. Geleneksel olmayan üretim yöntemleri | 6 |

BÖLÜM 2.

| | |
|--|----|
| EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİ VE BAĞLANTI ELEMANLARI | 8 |
| 2.1. Eklemeli Üretim Yöntemleri | 9 |
| 2.1.1. Fotopolimerizasyon..... | 9 |
| 2.1.1.1 SLA | 9 |
| 2.1.1.2. DLP | 10 |
| 2.1.2. Malzeme ekstrüzyonu | 11 |
| 2.1.2.1. FDM | 11 |
| 2.1.3. Sac laminasyon | 13 |
| 2.1.3.1 LOM..... | 13 |
| 2.1.4. Malzeme Püskürtme..... | 14 |
| 2.1.4.1. MJ/PJ (Çoklu püskürtme yöntemi) | 14 |
| 2.1.5. Toz yataklı eritme | 15 |

| | |
|--|----|
| 2.1.5.1. SLS/ SLM (Seçici lazer sinterleme- ergitme) | 15 |
| 2.1.5.6. EBM (Elektron ışınli ergitme) | 16 |
| 2.1.6.1. BJ (Bağlayıcı püskürtme)..... | 18 |
| 2.2. Bağlantı Elemanları..... | 19 |
| 2.2.1. Cıvatalar ve somunlar | 20 |
| 2.2.1.1. Metrik cıvatalar ve somunlar | 22 |

BÖLÜM 3.

| | |
|---|-----------|
| MATERYAL VE YÖNTEM..... | 24 |
| 3.1. Materyal | 26 |
| 3.1.1. PLA | 26 |
| 3.1.2. ABS | 28 |
| 3.1.3. PETG..... | 29 |
| 3.2. Deneyler | 31 |
| 3.2.1. Cıvata çekme dayanımı ve somun dış sıyırma testi | 32 |
| 3.2.2. Kayma dayanımı | 33 |

BÖLÜM 4.

| | |
|---|-----------|
| BULGULAR | 34 |
| 4.1. Cıvata Çekme Dayanımının Araştırılması | 34 |
| 4.1.1. PLA cıvata çekme dayanımı | 35 |
| 4.1.2. ABS cıvata çekme dayanımı | 39 |
| 4.1.3. PETG cıvata çekme dayanımı | 44 |
| 4.2. Cıvata Kayma Dayanımının Araştırılması | 49 |
| 4.2.1. PLA cıvata kayma dayanımı | 49 |
| 4.2.2. ABS cıvata kayma dayanımı | 54 |
| 4.2.3. PETG cıvata kayma dayanımı..... | 59 |
| 4.3. Somun Dış Dayanımının Araştırılması | 64 |
| 4.3.1. PLA somun dış dayanımı | 65 |
| 4.3.2. ABS somun dış dayanımı | 70 |
| 4.3.3. PETG somun dış dayanımı | 75 |
| 4.4. Genel Değerlendirme | 80 |

BÖLÜM 5.

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 84 |
|-----------------------------------|-----------|

| | |
|------------------------|-----------|
| KAYNAKLAR | 86 |
|------------------------|-----------|

| | |
|-------------------|-----------|
| EKLER..... | 91 |
|-------------------|-----------|

KISALTMALAR

| | |
|------|---|
| ABS | : Akrilonitril Bütadien Stiren |
| ASTM | : Amerikan Test ve Malzeme Derneği |
| BJ | : Binder Jetting |
| DLP | : Digital Light Processing |
| FDM | : Fused Deposition Modeling |
| MJ | : Material Jetting |
| LOM | : Laminated Object Manufacturing |
| PETG | : Polietilen Tereftalat Glikol |
| PJ | : Polyjet |
| PLA | : Polilatik Asit |
| SLA | : Stereolithography |
| SLM | : Seçici Lazer Ergitme (Selective Laser Melting) |
| SLS | : Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering) |

SİMGELER

| | |
|-----------------|---|
| a | : Adım (mm) |
| Ao | : Alan (mm ²) |
| b | : Bindirme oranı |
| D | : Cıvata başı köşeler arası mesafe (mm) |
| d | : Nominal çap (mm) |
| e | : Köşeler arası mesafe (mm) |
| E | : Young modülü |
| ε | : Birim uzama oranı |
| K | : Cıvata baş kalınlığı (mm) |
| L | : Nominal uzunluğu (mm) |
| ΔL | : Uzunluk değişimi (mm) |
| Lo | : İlk boy (mm) |
| m | : Somun kalınlığı (mm) |
| M | : Metrik |
| k | : Katman yükseliği (mm) |
| n | : Nozul sıcaklığı (PLA) |
| n _a | : Nozul sıcaklığı (ABS) |
| n _p | : Nozul sıcaklığı (PETG) |
| °C | : Sıcaklık (Celsius) |
| $\sigma(absc)$ | : ABS cıvata çekme gerilmesi (MPa) |
| $\sigma(abss)$ | : ABS somun dış sıyırma gerilmesi (MPa) |
| $\sigma(PETGc)$ | : PETG cıvata çekme gerilmesi (MPa) |
| $\sigma(PETGs)$ | : PETG dış sıyırma gerilmesi (MPa) |
| $\sigma(plac)$ | : PLA cıvata çekme gerilmesi (MPa) |
| $\sigma(plas)$ | : PLA dış sıyırma testi gerilmesi (MPa) |
| s | : Anahtar ağazı açıklığı (mm) |
| $\tau(absk)$ | : ABS kesme gerilmesi (MPa) |

$\tau(\text{petgk})$: PETG kesme gerilmesi (MPa)

$\tau(\text{plak})$: PLA kesme gerilmesi (MPa)



TABLULAR LİSTESİ

| | |
|--|-----|
| Tablo 2.1: Farklı türde cıvata yapıları..... | 21 |
| Tablo 2.2: Metrik cıvata tablosu. | 212 |
| Tablo 3.1. Değişken PLA deney parametreleri..... | 27 |
| Tablo 3.2. Değişken ABS parametreleri. | 29 |
| Tablo 3.3. Değişken PETG parametreleri. | 30 |
| Tablo 4.1. PLA malzemesi çekme dayanımı varyans analizi. | 37 |
| Tablo 4.2 ABS çekme dayanımı varyans analizi. | 41 |
| Tablo 4.3. PETG cıvata dayanımı varyans analizi. | 46 |
| Tablo 4.4. PLA kayma gerilmesi varyans analiz tablosu..... | 52 |
| Tablo 4.5. ABS kayma gerilmesi varyans analiz tablosu..... | 56 |
| Tablo 4.6. PETG kayma gerilmesi varyans analiz tablosu. | 62 |
| Tablo 4.7. PLA kayma gerilmesi varyans analiz tablosu..... | 67 |
| Tablo 4.8. ABS dış sıyırma testi varyans analiz tablosu..... | 72 |
| Tablo 4.9. PETG dış sıyırma testi varyans analiz tablosu. | 77 |
| Tablo 4.10: Deney gerilme sonuçları..... | 80 |

ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1: SLA yöntemi..... | 10 |
| Şekil 2.2: DLP yöntemi..... | 11 |
| Şekil 2.3: FDM yöntemi ile üretim. | 12 |
| Şekil 2.4: LOM yöntemi ile üretim..... | 13 |
| Şekil 2.5: MJ yöntemi ile üretim..... | 14 |
| Şekil 2.6: SLS ve SLM sistemleri..... | 16 |
| Şekil 2.7: EBM sistemi..... | 17 |
| Şekil 2.8: BJ yöntemi..... | 18 |
| Şekil 2.9: Cıvata helis yönleri. A: Sağ helis. B: Sol Helis..... | 20 |
| Şekil 2.10: Somun çeşitleri..... | 22 |
| Şekil 3.1. ISO standartlarında cıvata ve somun..... | 24 |
| Şekil 3.3. Flashprint programında cıvata görünümü..... | 25 |
| Şekil 3.4. Flashprint programında somun görünümü..... | 26 |
| Şekil 3.5. PLA numune görseli..... | 28 |
| Şekil 3.6: ABS numune görseli..... | 28 |
| Şekil 3.7: PETG malzemesi numuneleri..... | 30 |
| Şekil 3.8: Test makinesi..... | 31 |
| Şekil 3.9: Trapeziumx programında çekme dayanımı testi başlangıcı..... | 33 |
| Şekil 4.1: Çekme testleri. A: PLA cıvata. B: PETG cıvata. C: ABS cıvata..... | 34 |
| Şekil 4.2: PLA çekme dayanımı için % uzama grafiği..... | 35 |
| Şekil 4.3: PLA malzemesi için gerilme grafiği..... | 36 |
| Şekil 4.4: Gerilme üzerinde baskı parametrelerinin etkisi (PLA)..... | 36 |
| Şekil 4.5: PLA çekme dayanımı gerilme – katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı kontür grafiği..... | 38 |
| Şekil 4.6: Minitab PLA cıvata çekme dayanımı deney sonuçları değerlendirme grafiği..... | 39 |
| Şekil 4.7: ABS cıvata çekme dayanımı % uzama grafiği..... | 40 |
| Şekil 4.8: ABS cıvata çekme dayanımı gerilme grafiği..... | 40 |
| Şekil 4.9: Gerilme üzerinde baskı parametrelerinin etkisi..... | 41 |
| Şekil 4.10: ABS cıvata çekme dayanımı gerilme – katman yükseliği ve nozul sıcaklığı kontür grafiği..... | 43 |
| Şekil 4.11: Minitab optimum parametre grafiği (ABS cıvata çekme dayanımı). | 44 |
| Şekil 4.12: PETG cıvata çekme dayanımı % uzama grafiği..... | 45 |
| Şekil 4.13: PETG cıvata çekme dayanımı gerilme grafiği..... | 45 |
| Şekil 4.14: PETG cıvata gerilme üzerinde baskı parametrelerinin etkisi..... | 46 |
| Şekil 4.15: PETG gerilme, nozul sıcaklığı-bindirme oranı kontür grafiği..... | 48 |
| Şekil 4.16: PETG çekme dayanımı optimum değer grafiği..... | 48 |
| Şekil 4.17: Kayma gerilmesi testi. A: PLA. B: ABS. C: PETG..... | 49 |
| Şekil 4.18: PLA kayma gerilmesi testi % uzama sonuçları..... | 50 |
| Şekil 4.19: PLA kayma gerilmesi testi gerilme grafiği..... | 51 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 4.20: PLA parametre etki grafiği (kayma gerilmesi)..... | 51 |
| Şekil 4.21: PLA nozul sıcaklığı- katman kalınlığı gerilme kontür grafiği..... | 53 |
| Şekil 4.22: PLA optimum parametre etki grafiği (kayma gerilmesi)..... | 54 |
| Şekil 4.23: ABS kayma dayanımı % uzama grafiği..... | 55 |
| Şekil 4.24: ABS kayma dayanımı gerilme grafiği. | 55 |
| Şekil 4.25: PLA parametre etki grafiği (kayma gerilmesi). | 56 |
| Şekil 4.27: ABS kayma dayanımı nozul sıcaklığı ve bindirme oranı kontür grafiği. | 58 |
| Şekil 4.28: ABS optimum parametre grafiği (kayma gerilmesi). | 59 |
| Şekil 4.29: PETG kayma dayanımı % uzama grafiği. | 60 |
| Şekil 4.30: ABS kayma dayanımı gerilme grafiği. | 60 |
| Şekil 4.31: ABS parametre etki grafiği (kayma gerilmesi)..... | 61 |
| Şekil 4.32: PETG kayma dayanımı nozul sıcaklığı ve bindirme oranı kontür grafiği. | 63 |
| Şekil 4.33: PETG optimum parametre grafiği (kayma gerilmesi). | 64 |
| Şekil 4.34: Diş sıyırma testi PETG (a), ABS (b) ve PLA (c)..... | 65 |
| Şekil 4.35: PLA malzemesi somun diş dayanımı % uzama sonuçları. | 65 |
| Şekil 4.36: PLA malzemesi somun diş dayanımı gerilme grafiği..... | 66 |
| Şekil 4.37: PLA parametre etki grafiği (somun diş dayanımı). | 67 |
| Şekil 4.38: PLA gerilme, katman kalınlığı- nozul sıcaklığı kontür grafiği (somun diş dayanımı). | 69 |
| Şekil 4.39: PLA optimum parametre grafiği (somun diş dayanımı)..... | 70 |
| Şekil 4.40: ABS malzemesi somun diş dayanımı % uzama grafiği. | 71 |
| Şekil 4.41 ABS malzemesi somun diş dayanımı gerilme grafiği. | 71 |
| Şekil 4.42: ABS parametre etki grafiği (somun diş dayanımı). | 72 |
| Şekil 4.43: ABS gerilme, katman kalınlığı- bindirme oranı kontür grafiği (somun diş dayanımı). | 74 |
| Şekil 4.44: ABS optimum parametre grafiği (somun diş dayanımı)..... | 75 |
| Şekil 4.45: PETG malzemesi somun diş dayanımı % uzama grafiği..... | 76 |
| Şekil 4.46: PETG malzemesi somun diş dayanımı gerilme grafiği. | 76 |
| Şekil 4.47: PETG parametre etki grafiği (somun diş dayanımı)..... | 77 |
| Şekil 4.48: PETG gerilme, katman kalınlığı- bindirme oranı kontür grafiği (somun diş dayanımı). | 79 |
| Şekil 4.49: PETG optimum parametre grafiği (somun diş dayanımı). | 80 |
| Şekil 4.50: Cıvata çekme dayanımı sonuç grafiği..... | 82 |
| Şekil 4.51: Cıvata kayma dayanımı sonuç grafiği. | 82 |
| Şekil 4.52: Somun diş dayanımı sonuç grafiği. | 83 |
| Şekil A.1: Somun diş dayanımı test sonucunda numunelerin görünümü. | 911 |
| Şekil A.2: Kayma gerilme dayanımı test sonucunda numunelerin görünümü..... | 922 |
| Şekil A.3: Çekme gerilme dayanımı test sonucunda numunelerin görünümü..... | 933 |

EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİ İLE BAĞLANTI ELEMANI ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Günümüzde yaşam gereksinimleri ve tüketim, teknolojik gelişmelerin üretim yöntemlerine önemli bir şekilde etki etmektedir. İlk teknolojik hareketten bu güne sanayi oldukça gelişmiş, kendi içerisindeki rekabeti ile her gün değişmeye devam etmektedir. Tüketim aynı zamanda ürün çeşitliliğini de etkilemiş, değişen ürün çeşitleriyle kullanım alanına göre de malzeme yapıları da etkilenmiştir. Hayatımızda bu ihtiyaçlara kulak verilerek geliştirilmiş, çağın gereksinimleriyle bilgisayar destekli imalat yöntemlerinden olan eklemeli üretim, sektörde hızlıca yerini almıştır. Özellikle otomotiv, medikal, havacılık ve inşaat sektörlerinde kullanımı tercih edilmektedir. FDM teknolojisi eklemeli imalatla birlikte hayatımıza girmiş, amatör kullanıcıların dahi kolay kullanımı sebebiyle tercihi olmuştur. Karmaşık yapıdaki kompleks ürünler bile tek seferde imal edilebilir olması bu yöntemi cazip kılmaktadır. Bu sebeple eklemeli imalat tasarımcıya özgür bir çalışma alanı sağlamaktadır. Montajlı parçalar bile platform ölçülerine göre tek seferde üretildiğinden, prototiplemede de sık tercih edilmektedir. Sektörde sıkça kullanılan, montajda sökülebilir bağlantı elemanları olarak tercih edilen somun ve civataların eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiştir. Amaç özellikle havacılık gibi alanda kullanılan bu ürünlerin ağırlıklarını azaltarak alternatif bir üretim yöntemi arayışıdır. Yapılan çalışmada ISO standartlarındaki M12 civata ve somun tercih edilmiştir. Bu çalışmada PLA, PETG ve ABS malzemeleri için 15'şer farklı deney oluşturulup, her deney 3 tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Civata gerilmesi için 45, somun dış sıyırma testi için 45, civata kayma gerilmesi için 45 test, toplamda 135 test yapılmıştır. Somun için toplamda 15 deney setinden 45 numune ile test gerçekleştirilmiştir. Tüm testlerde en iyi mekanik sonuçlara PLA malzemesi ile erişilmiştir. Çekme ve dış sıyırma testlerinde ABS malzemesi PETG malzemesine göre daha zayıf kalırken, kayma dayanımında durum tam tersidir. Tüm ürünler için sıcaklığın önemli bir etken olduğu görülmüş, PLA deneydeki türdeşlerine göre daha düşük baskı sıcaklığı ile üretilmiştir. ABS ve PETG malzemeleri kimyasal yapılarından dolayı, bindirme oranından daha fazla etkilenmiştir. Bindirme oranı diğer parametreler ile birleştirildiğinde mekanik test sonuçlarında fark oluşturduğu anlaşılmıştır. Bindirme oranının etkisi katman kalınlığı parametresiyle birlikte incelendiğinde alanda artma ve azalma miktarı değiştiğinden, veriler üzerinde önemli bir sonuç ortaya koymuştur. Kullanılan malzemelerde bu üç parametre birleştiğinde farklı etkiler gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: ABS, Civata, FDM, PETG, PLA, Somun

INVESTIGATION OF FASTENER PRODUCTION USING THE ADDITIONAL MANUFACTURING METHOD

ABSTRACT

Today, life requirements and consumption significantly affect the production methods of technological developments. Since the first technological movement, the industry has developed considerably and continues to change every day with its internal competition. Consumption has also affected product diversity, and material structures have also been affected by the changing product varieties according to the area of use. Additive manufacturing, which is one of the computer-aided manufacturing methods developed by listening to these needs in our lives and the requirements of the age, has quickly taken its place in the sector. It is especially preferred to be used in the automotive, medical, aviation and construction sectors. FDM technology has entered our lives with additive manufacturing and has become the choice of even amateur users due to its easy use. The fact that even complex products with complex structures can be manufactured in one go makes this method attractive. For this reason, additive manufacturing provides the designer with a free working area. Since even assembled parts are manufactured in one go according to platform dimensions, it is also frequently preferred in prototyping. Nuts and bolts, which are frequently used in the sector and preferred as removable fasteners in assembly, have been produced with the additive manufacturing method. The aim is to reduce the weight of these products, especially used in areas such as aviation, and to seek an alternative production method. In the study, M12 bolts and nuts in ISO standards were preferred. In this study, 15 different experiments were created for PLA, PETG and ABS materials, and each experiment was carried out with 3 repetitions. 45 tests were performed for bolt tension, 45 for nut thread stripping test, and 45 for bolt shear stress, a Toplam of 135 tests. The best mechanical results were achieved with PLA material in all tests. While ABS material was weaker than PETG material in tensile and thread stripping tests, the situation was the opposite in the shear test. It was seen that temperature was an important factor for all products, and PLA was produced with a lower printing temperature compared to its counterparts in the experiment. ABS and PETG materials were affected more by the overlap ratio due to their chemical structures. It was understood that the overlap ratio created a difference in mechanical test results when combined with other parameters. When the effect of the overlap ratio was examined together with the layer thickness parameter, since the amount of increase and decrease in the area changed, an important result was obtained on the data. It was seen that these three parameters showed different effects when combined in the materials used.

Keywords: ABS, Bolt, FDM, Nut, PETG, PLA

BÖLÜM 1. GİRİŞ

İlk teknolojik alet olarak kabul ettiğimiz tekerleğin var olduğu günden beri insanlık, her amaca uygun yeni araçlar geliştirmeyi amaçlamıştır. Zamanla insanlık ihtiyaçları doğrultusunda gelişen tüketim, ürün çeşitliliğine neden olmuştur (Symes vd. 2012). Bu doğrultuda oluşan talepler, düzenli imalatla beraber farklı üretim yöntemlerini de ortaya çıkarmıştır. Kullanılan malzemeler başlangıçta taş iken, tunç devri ile bakır, tunç ve demir farklı yöntemler ile işlenmiştir. Metal şekil verme yöntemlerinin artmasıyla birlikte hayatı kolaylaştıracak icatlar tarihte yerini hızlıca almaya başlamıştır. Bunların en büyük adımlarından biri Sanayi devri olmuştur. Sanayi Devrimi buharlı makineler sayesinde gerçekleşmiştir, Endüstri 1.0 bu hareketle adımlarını atmıştır. Elektrik motorları ve sistematik üretim yapısına geçişle birlikte Endüstri 2.0 yapısına geçilmiştir. 20. yüzyıl ile kullanılan imalat makinelerinde otomasyona gidilerek insan gücü azaltılıp, akıllı teknolojiler ve robotik yapılar kullanılmıştır (Saraçoğluyakup, Delibaş, ve Özçelik 2022). Bu da beraberinde imalattaki süreci kısaltarak, imalatta bilgisayarlar kullanılmaya başlanmıştır. Bilgisayarlı imalat olarak ifade edilen Endüstri 3.0, CNC makineler ve robotlaşma prosesi olarak da bilinir. Günümüzde Endüstri 4.0 prosesine geçilmiş olup bu proses Eklemlenmiş imalat ve Dijital imalat yöntemi olarak anılmaktadır (Uslu 2022).

Endüstri 4.0 bilgisayar teknolojilerinin sadece imalatta kullanılması olmaktan çıkarak tamamen dijital bir üretim prosesi alanını oluşturur. İnternet ve yapay zekâ destekli olan bu sistem üretim süresince her türlü aşamada kullanıcıya keskin bilgiler ve kaliteli bir üretim sunmaktadır. Üretimdeki proses iyileşmesiyle de maliyet düşüşleri meydana gelmiştir (Nurdin ve Hakim 2015). Günümüzde Endüstri 4.0'dan sonra 3 boyutlu yazıcı ile üretim hızla gelişmiş ve yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu yöntemin, geleneksel imalat yöntemlerinden sıyrılan keskin yanları bulunmakta olup, özellikle hızlı prototipleme için oldukça kullanışlı bir yöntem haline gelmiştir. Dijitalleşme ile gelişen Endüstri 4.0 parçalarda daha hızlı ve oldukça verimli üretim imkanı sağlamaktadır (Abdul-Rashid vd. 2017; Jayal vd. 2010) .

1.1. Tezin Amacı

Çalışma kapsamında ISO standartlarındaki M12 cıvata ve somunlar farklı özelliklerle üretilmiştir. Bu araştırmadaki nihai amaç PETG, ABS ve PLA malzemeleri ile üretilen bağlantı elemanlarını (cıvata ve somun), farklı üretim parametreleri ile üretilen, ilgili testlerle sınavarak ideal baskı parametreleri elde etmektir.

1.2. Literatür Araştırması

Tekerlekten bugüne teknoloji oldukça büyük aşamalar kaydetmiştir. Sanayi Devrimi (Endüstri 1.0) ile buharlı makineler hayatımıza girmiştir. Bu teknolojik hareketi elektrik motorlarının icadı ile Endüstri 2.0 takip etmiştir. İmalattaki insan gücünü azaltan adım bilgisayar teknolojilerinin imalata entegre edilmesiyle, Endüstri 3.0'la gerçekleşmiştir. Bu adımla birlikte CNC kontrollü makineler hayatımıza girmiştir. İnternet teknolojisi ve dijitalleşme Endüstri 4.0 hareketini başlatmıştır (Saraçoğluyakup vd. 2022). Eklemeli imalat tam da bu endüstri hareketiyle birlikte hayatımıza girmiştir. Bu imalat çeşidi ile ilgili alınan ilk patent 1980 yılına dayanmaktadır. 1986 yılında ise SLA baskı türünde Chuck Hull tarafından Amerika'da alınmış olup ticari olarak kullanımın adımları da atılmıştır. Zamanla sırasıyla FDM ve SLD teknolojileri imalat hayatına katılmıştır (Parupelli ve Desai 2019). Temel bir prensiple anlatılırsa eklemeli imalat, katmanların üst üste istiflenmesi ile oluşturulan bir üretim çeşitidir. Geleneksel imalat yöntemlerinden en belirgin farkı, karmaşık yapıdaki parçaları tek seferde üretmeye imkân kılar. Kullanım kolaylığı hızlı prototipleme yapılabilmesi, maliyetinin düşük olması gibi sebeplerden dolayı, Otomotiv, Havacılık, Sağlık gibi alanlarda sıkça tercih edilmektedir (Gibson, Rosen, ve Stucker 2010; Jayal vd. 2010)

Dusanapudi ve arkadaşları, bir çalışmada FDM yöntemini Taguchi metodu ile inceleyerek yüzey pürüzlüğünü optimize etmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada eklemeli imalat yöntemlerinden olan 3 boyutlu yazıcıların yüzey kalitesini iyileştirmek için uygun parametreler araştırılmıştır. L9 (otogonal) yöntemi tercih edilmiş olup, farklı çeşitler denenmiştir. Ra (ortalama yüzey pürüzlülüğü) için uygun dolgu ve parametre değerleri araştırılmış olup, S/N (sinyal/gürültü) değeri kullanılarak bir analiz

gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen ideal parametreler; ekstrüzyon çarpanı:1, sıcaklık 240 °, katman kalınlığı: 0,1mm'dir. Yapılan analizle baskı hızı, katman kalınlığı gibi değerlerin etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda üretim sistemleri için iyileştirici bir metot olduğu ortaya koyulmuştur (Dusanapudi vd. 2023).

PLA malzemeler üretiminde eklemeli imalat, FDM yöntemi ile yapılan bir çalışmada, farklı yönlerde (XYZ, XYZ, YZX, YXZ, ZXY, XZY) üretilmiş ve ilgili mekanik testlere (SEM, çekme, eğme, yüzey pürüzlülüğü) tabi tutulmuştur. Yapılan deney ve gözlemlerde; XYZ ve YZX eksenlerinde yüksek oranda pürüzlülük elde edilirken, XYZ ve YZX eksenlerinde düşük pürüzlülük elde edilmiştir. Çekme dayanımı sonuçlarında yaklaşık olarak 60 MPa ile XZY ve YZX en yüksek oran gözlemlenmektedir. Aşınma oranları en düşük olan eksenler, XYZ ve YZX'tir. Mikro çatlak ve aşınma XZY ve YZX miktarları en düşük olan eksenlerdir. Eğme testinde en düşük sonuçlara ulaşmış yönler XZY ve YZX'tir. Çalışma sonucunda PLA malzemelerin üretim yönünün mekanik sonuçlar üzerindeki önemli etkileri ortaya koyulmuştur (Elmas 2021).

FDM yöntemi ile PLA malzemeyle yapılan bir çalışmada aynı standartta farklı boyutlardaki cıvatalar incelenmiştir. Cıvatalar sırasıyla M42, M48, M56, M60 ve M64 ölçülerinde seçilmiş olup statik (çevrimsel basınç) testi uygulanmıştır. Basınç modülü (ortalama değer) 918 ± 185 MPA olarak bulunmuş ve çap küçüldükçe değerinde büyüme gözlemlenmiştir. Depolama (E') modülü artarken, kayıp (E'') modülünde, azalma yüklem frekansı artışı ile gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında cıvatalarda %11 civarında hasar gözlenmiş ve kırılmalarla karşılaşmıştır. Yapılan kontroller neticesinde PLA malzemenin üretilen cıvatalar için düşük ve orta seviye güç ile kullanılabilir potansiyelde olduğu ortaya koyulmuştur (Kukla vd. 2022).

Dişli bağlantılı elemanların eklemeli imalat yöntemi kullanılarak üretilmesiyle ilgili yapılan çalışmada, imal edilen parçaların mekanik özellikleri gözlemlenmiştir. Yapılan bu incelemede doluluk (%50, %75, %100), katman yönelimi (X, Y, Z) değişkenlerini, ilgili testler ile (darbe ve çekme dayanımları, aşınma dirençleri) deneye tabi tutarak, PETG malzemesinin mukavemet özellikleri test edilmiştir. Araştırmada nozul sıcaklığı, baskı hızı, katman kalınlığı parametreleri sabit tutulmuştur. X yönünde baskı alınan numuneler %30 ile %60 oranında daha iyi sonuç verirken, doluluk oranı incelendiğinde %100 doluluk yapılan tüm testlerde en iyi sonucu sergilemiştir. Anizotropik (mekanik, termal, yön) açıdan bakıldığında da belirtilen parametrelerde

en iyi performansın yön ve doluluk oranına bağlı olduğu ortaya koyulmuştur (Ranganathan vd. 2020).

Yapılan bir çalışmada PLA malzemesi hızlı darbe altında bırakılarak 3 boyutlu yazıcı PLA malzemesinden imal edilen altıgen çekirdek yapı incelenmiştir. Baskı parametrelerinde değişken olan duvar kalınlığı 0,8mm, 1,2mm ve 1,6mm seçilmiştir. Bununla birlikte çekirdekleri de 6, 9, 12 hücreler kullanılmıştır. Bu hücreler CFRP (karbon fiber takviyeli plakalar) ile birleştirilmiştir. Yapılan testler ASTM D7766 standartlarında olup, darbe enerji değişimleri 30J ve 100J arasındadır. Enerji uygulanan numunelere her seviyesi için emilen enerji miktarı, temas süreleri ve çökme miktarları ölçülmüştür. Darbe enerjisi arttırıldığında yüzey ve çekirdek yapılarda hasarın arttığı, 80J altında yüksek hasar, 100J seviyesinde delinmeler olduğu sonucuna varılmıştır. 6mm çekirdek hücrede diğer yapılardan daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır ve geri kalan yapılarda delinme mevcutken sadece çökme gözlemlenmiştir. Çalışma ile PLA malzeme ile CFRP arasındaki yapışmanın da uyumlu olmasıyla hafif ve darbe dayanımı yüksek kompozit alternatif bulunmuştur (Kaveloğlu vd. 2022).

Seeram ve arkadaşları ISO standartlarındaki M12 cıvatalar ve somunlar üzerine çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, ABS ve PLA malzemelerini kullanarak baskı alınmıştır. Nozul çapı (0,4mm) ve katman kalınlığı (0,1mm) sabit tutulmuştur. Üretimi yapılan parçalar deformasyon, eşdeğer gerilme ve kesme testleri uygulanmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde deformasyon, eşdeğer gerilme, kayma dayanımı sonuçları PLA malzemesi için sırasıyla, 300 N, 3,87 MPa, 4,1 MPa ve ABS malzeme için sırasıyla, 270 N, 3,6 MPa, 3,69MPa'dır. Deney sonuçları incelendiğinde PLA malzemenin ABS malzemeye karşı mekanik performansı daha iyi olduğu gözlemlenmiştir (Harshitha ve Rao 2019).

Selim'in yapmış olduğu çalışmada TPU, ABS ve PLA malzemelerin çekme dayanımları incelenmiştir. Doluluk oranları (%30-%70), baskı sıcaklığı (200°C-220°C) değişken parametreleri ile FDM yönteminde üretim gerçekleştirilip çekme dayanımı ve kopma uzaması gözlemlenmiştir. Deney bulgularına bakıldığında, en yüksek çekme dayanımı 29.90 MPa ile ABS malzemesinde (%70 doluluk ve 220°C sıcaklık), en düşük çekme dayanımı 4.17 MPa ile TPU malzeme (%30 doluluk, 220°C sıcaklık) olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonuçları incelendiğinde TPU malzemenin kopma uzaması (esneklik) en iyi performansı göstermiştir. Aynı zamanda

dolgu oranı arttığında sonuçların tüm malzemeler için arttığı görülmüştür (Bacak 2022) .

1.3. Hipotez

3D yazıcıda, baskı parametrelerinin (baskı sıcaklığı, katman kalınlığı ve duvar sayısı) mekanik özellikler üzerindeki etkisi oldukça önem arz etmektedir. Özellikle katman kalınlığı, doluluk ve baskı sıcaklığı gibi etkenlerin optimize hale getirilmesi, üretilen parçaların mekanik özelliklerini (dayanım, mukavemet) yükseltme potansiyeli vardır (Dawoud, Taha, ve Ebeid 2016; Masood 2014). Bu parametrelerde yapılacak değişiklikler, 3D yazıcı ile üretilen M12 civata ve somunların çekme dayanımı, aksel sıyırma direnci ve genel mukavemet gibi mekanik performansları doğrudan ilişkilidir. Özellikle katman kalınlığı, duvar sayısı ve baskı sıcaklığının belirli kombinasyonları, bağlantı elemanlarının mekanik dayanımını arttırarak maksimum sonuç elde edilmesini sağlayacaktır.

Bu çalışma ile birlikte, eklemeli imalat yöntemiyle farklı baskı parametrelerinde üretilen M12 bağlantı elemanlarının mekanik testler (örneğin, çekme dayanımı ve aksel sıyırma testi) yoluyla elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla sınanacaktır. Çalışma kapsamında, baskı parametreleri sistematik olarak değiştirilerek (katman kalınlığı, bindirme oranı, nozul sıcaklığı) her bir kombinasyonun bağlantı elemanları üzerindeki etkisi değerlendirilecektir.

Hipotezin arkasındaki düşünce, 3D baskı sürecinde katman kalınlığı, bindirme oranı ve baskı sıcaklığı gibi parametrelerin, malzemeler arası katman yapışmasını ve dolayısıyla mekanik dayanımı doğrudan etkileyen kritik etkenler olduğudur. Bu parametreler arasında optimum bir denge kurularak üretilen parçaların hem yapısal bütünlük hem de dayanıklılık açısından en iyi sonuçları vereceği tahmin edilmektedir. Sonuç olarak; hipotez, bu faktörlerin belirli bir kombinasyonunun, eklemeli imalat yöntemi ile üretilen bağlantı elemanlarının en yüksek mekanik dayanımı sağlamasına yol açacağı üzerine kurulmaktadır.

Çalışmanın nihai amacı; baskı parametrelerinin optimize edilmesi yoluyla eklemeli imalat ile üretilen M12 bağlantı elemanlarının endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir düzeyde, mekanik performans göstermesini sağlayacak en iyi baskı koşullarını belirlemektir.

1.4. İmalat Yöntemleri

İnsanlığın varolduğu ilk günden bugüne kadar gerek hayatta kalmak gerekse hayatı kolaylaştırmak için çeşitli yöntemlerle üretilen ürünlere ihtiyaç duyulmuştur. Zaman geçtikçe insanlığın da ihtiyaçları artmıştır. Bu doğrultuda teknoloji gelişmek zorunda kalmıştır. Teknoloji ilerlemesi ile imalatın büyümesi kaçınılmaz bir birliktelik içindedir. Tekerleğin icadından bugüne kadar ki zamanda gelişimler ihtiyaç ve amaca uygunluk olgusunda ilerlemiştir. Temel olarak iki imalat şekli bulunmaktadır. Bunlar Geleneksel İmalat ve Modern İmalat yöntemleridir (Jimo vd. 2019).

Geleneksel imalat yöntemleri kendi içerisinde geleneksel veya modern olarak ayrılmaktadır. Geleneksel imalat kendi içinde dokuz ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar; talaşlı imalat, döküm, kaynak, lehim, haddeleme, dövme, sac metal işleme ve montajdır (Gavas vd. 2022; Kaikai, Yadong, ve Qiang 2023). Geleneksel imalat yöntemleri zamanla yerini Modern imalat yöntemleriyle paylaşmaya başlamıştır. Modern imalat yöntemlerine geçişin bir sebebi de artık geleneksel yöntemlerle işlenemeyecek malzemeler üretmemizdir.

1.4.1. Geleneksel üretim yöntemleri

Üzerine yıllardır çalışılmakta olan geleneksel imalat yöntemleri, en çok tercih edilen üretim metotudur. Hayatımıza 2. Dünya savaşı sonrası girmiştir. Geçmişten günümüze kendini geliştiren bu yöntem, uzun yıllardır kullanıldığından en güvenli seçenektir (Anonim t.y.-a). Genellikle hacim küçültülerek (talaş kaldırma, kesme, döküm v.b) ya da mevcut alanı genişletmek için gerçekleştirilen işlemlerle tanınmaktadır. Seri imalat için oldukça maliyeti azaltan bu yöntem, tekil üretimde (prototipleme) maliyeti arttırmaktadır (Kadir, Yusof, ve Wahab 2020). Metal, polimer, seramik gibi malzemelerin ürün haline getirilmesi için optimum işleme prensipleri ortaya koyulmuş ve ideal yöntemler keşfedilmiştir (Tanaka vd. 2020) .

1.4.2. Geleneksel olmayan üretim yöntemleri

Hayatımızda son zamanlarda oldukça adını işitmiş olduğumuz ileri imalat yöntemleri, gelişen teknolojinin malzeme teminindeki gereksinimleri ile sektörde yerini almıştır. Alışıla gelmiş olan işlemlerin dışında daha çok hassasiyet gerektiren işlerde oldukça tercih edilmektedir. Çağın gereksinimlerinde adı sıkça otomotiv, havacılık ve uzay

sektörlerinde duyulmaktadır. Geleneksel yöntemler ile işlenmeyen malzemeleri bu yöntem ile oldukça hızlı imal edebildiğimizden, üretimin yeni soluğu ünvanını taşır. Genel olarak incelendiğinde modern imalat, maliyeti düşürerek üretim prosesini hızlandırmaktadır ki, karmaşık parçalarda bile eski yöntemlere göre daha az ve verimli sonuçlar göstermektedir (Dedeakayoğulları ve Kaçal 2020; Mikell P. Groover 2021).



BÖLÜM 2. EKLEMELİ ÜRETİM YÖNTEMİ VE BAĞLANTI ELEMENLARI

Tekerleğin icadından bugüne kadar ki süreçte insan gündelik ihtiyaçları karşılamak adına adımlar atarak en hızlı ve en kullanışlı aletler geliştirerek bir çok materyalin mucidi olmuştur. Neolitik dönemden beri bu arayış zamanla şekillenmiştir. Başlarda kas gücü, devamında yenilenebilir enerjiler (rüzgar, akarsu) ile teknolojinin adımları atılmıştır. Fransız İhtilali ile bu süreç oldukça hızlanmıştır. 1. Endüstri Devrimi, İngiltere’de adımları atılmış olan Buharlı Makinelerle başlamıştır. Endüstri 1.0’ı suyun ve buharın gücü olarak tanımlayabiliriz. Endüstri 2.0’ı da bu sistemin elektrik ile birleşimi olarak adlandırabiliriz. Bu gelişimden farklı olarak Endüstri 3.0’ın doğuşu bilginin işlenmesi ile otomatik teknolojilerin kullanılmasıdır (Uslu 2022). Sanayi Devrimi ile başlayan süreç, otomasyonun devreye girmesi ve Endüstri 4.0'a kadar uzanmasıyla büyük bir ivme kazanmıştır. Otomasyonun ortaya çıkışı, geleneksel üretim yöntemlerini geride bırakarak makine gücünü ve üretim hızını arttırmıştır. Bu dönemde, özellikle hızlı prototipleme gibi ihtiyaçlar doğrultusunda eklemeli imalat teknolojileri de öne çıkmıştır. Eklemeli imalat, malzemelerin katmanlar halinde birleştirilmesiyle üç boyutlu ürünlerin oluşturulmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu sebeple ismi 'Katmanlı İmalat Yöntemi' olarak anılmaktadır. Bu teknik, genellikle malzemenin eriyik haliyle katmanlar oluşturularak katı bir formda nihai ürünü ortaya çıkartır.

Eklemeli imalat, kullanılan malzeme ve üretim süreçlerine göre sınıflandırılabilir. İşçilik gibi manuel müdahaleleri azaltarak karmaşık parçaların üretiminde dahi kolaylık sağlar. Üretim sürecinde iş gücünü, malzeme kullanımını ve işlem süresini düşürdüğü için maliyet avantajı yaratır. Özellikle prototip üretiminde tercih edilmesinin nedeni, daha az montaj gerektirmesi ve nihai ürüne daha yakın çözümler sunmasıdır. Geleneksel imalat yöntemlerinden esnekliği, kullanılan malzeme yelpazesi ve işleme yöntemleri gibi belirgin özellikleri ile ayrılmaktadır. Bu sebeplerle

eklemeli imalat, endüstrinin dijitalleşmesi ve otomasyonun yaygınlaşması ile birlikte birçok sektörde önemli bir yer edinmiştir. Gelişen teknoloji ile baskı yöntemleri de çeşitlenmiş ve farklı uygulamalar ortaya çıkmıştır (Kaikai vd. 2023).

2.1. Eklemeli Üretim Yöntemleri

Bilgisayar destekli tasarım programlarında yapılmış olan 3 boyutlu katı model (CAD)' .stl' uzantılı dosyaya çevrilir. Arayüz (dilimleme) programları kullanılarak katı model dilimlenir. Kullanılan yöntemlere göre ürün yolu belirlenir. Kısaca bu yol G kodları ile belirlenmektedir. Bütün yöntemlerde olduğu gibi yazdırma işlemi başlamadan önce, parametreler seçilen yöntemlere göre belirlenerek, ilgili programda girildi oluşturulur. Üretim gerçekleştirilmeden simülasyon gerçekleştirilir. Bu da üretim anında yaşanacak ön görülemeyen problemleri önceden fark edilmesine imkan verir. Bu teknoloji havacılık, otomotiv, gıda ve benzeri bir çok sektörde tercih edilmektedir (Seçgin 2021).

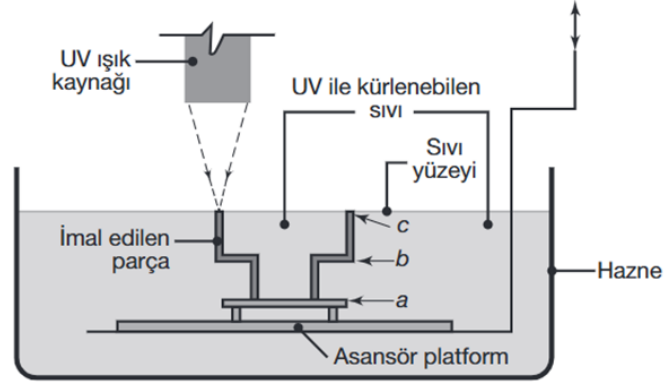
2.1.1. Fotopolimerizasyon

İsminden de anlaşılacağı üzere ışık enerjisini kullanılarak yapılan eklemeli üretim yöntemidir. Sıvı haldeki fotopolimer reçine (sert, esnek, v.b) bu yöntem için tercih edilmektedir (Başçı ve Yamanoğlu 2022). Katman katman düşürülen reçine her katman sonunda kürleme (UV, görünür ışık) işlemine alınır (Gibson, Rosen, ve Stucker 2015). Ürün yazdırımı bittiğinde de ek kürleme işlemi yapılır. Tüm üretim süreçleri bittikten sonra, malzeme alkol ile temizlenir. Eklemeli imalatın ilk bulunan yöntemi olan bu metot, yüksek hızlarda baskı gerçekleştirilmesine rağmen yüzey kalitesi oldukça iyidir. Bu sebeple sağlık ve otomotiv sektörlerinde sıkça tercih edilmektedir.

2.1.1.1 SLA

Eklemeli imalatın atası olarak kabul edilen SLA (Stereolithography), ışık kullanarak sertleştirme prensibi ile parça üretir. İçi fotopolimer sıvı reçine (termoset) dolu tank içerisine, seçilen alanlarda UV ışını ile sertleştirme işlemi yapılarak üretim gerçekleştirilir (Kalpakjian ve Schmid 2017). X-Y ekseninde hareket eden galvanometrik aynalar seçilen alanı katılaştırır. Daha basit bir tabirle yukarıdan aşağıya

seçici şekilde sıvı reçine katılaştırılıp üst üste eklenerek ürün imalatı gerçekleştirilir (Gavas vd. 2022). Şekil 2.1’de SLA yönteminin şematik olarak görüntüsü paylaşılmıştır.

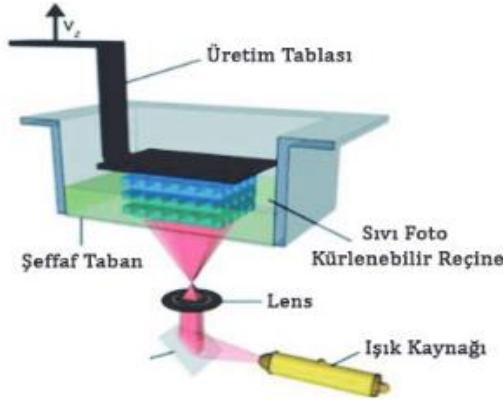


Şekil 2.1: SLA yöntemi (Şahin 2022).

SLA yöntemi hassasiyet ve tolerans değeri yüksek ürünlerde yoğun olarak tercih edilmektedir. Yüzey doğruluğu ve yüksek çözünürlüğü sebebiyle en karmaşık geometrilere bile oldukça iyi sonuçlar vermektedir.

2.1.1.2. DLP

DMD sistem ile ilk patenti 1990’lı yıllarda alınmıştır (Hornbeck 1993). Bu sistem mikro aynaları dijital şekilde kontrol edilerek, ışığa yön vermektedir. Çeşitli görüntüleme tekniklerinde tercih edilen teknoloji, yüksek çözünürlük ve parlak görüntülerin projeksiyonunu sağlamaktadır. DLP’de bu teknolojinin eklemeli imalat versiyonudur. DMD üzerine yansıtılan ışık kaynağı (LED, lamba) ayna hareketleriyle görüntüyü oluşturur. Şekil 2.3’de DLP yönteminin iç yapısını gösteren bir görsel paylaşılmıştır.



Şekil 2.2: DLP yöntemi (Gavas vd. 2022).

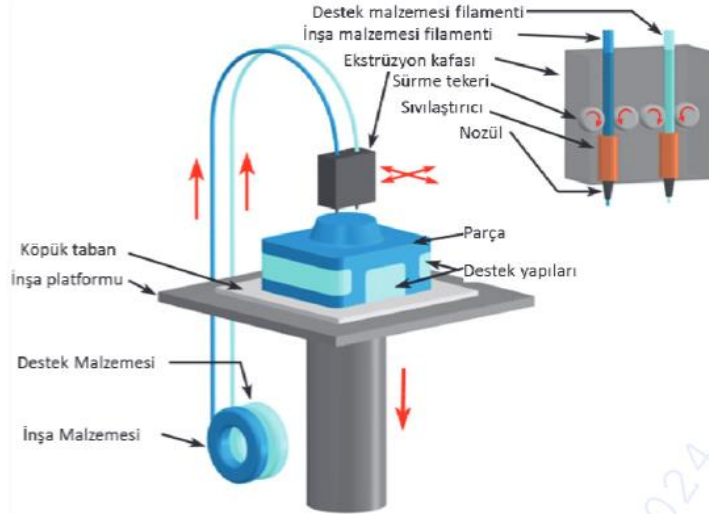
Sıvı fotopolimer reçine tanka doldurulur ve tabla tanka batırılır. Katman kalınlığı belirlenen mesafe için tabla şeffaf zemine yakınlaştırılır. Uygun mesafeye gelen katman ışık altında katılaşmaya başlar. Bu işlem ürün tamamen elde edilene kadar devam ettirilir. Elde edilen ürün son işlem olarak alkol ile temizlenir. Hızlı ve yüzey kusurlarının az olması sebebi ile kuyumculuk gibi alanlarda tercih edilmektedir.

2.1.2. Malzeme ekstrüzyonu

Eklemeli imalat yöntemlerinden olan malzeme ekstrüzyonu sıklıkla tercih edilen yöntemdir. Genel olarak incelendiğinde, termoplastik malzemelerin ısıtılarak katman katman istiflenmesine verilen isimdir. Türdeşlerine göre oldukça ekonomik oluşundan dolayı her kullanıcıya hitap eder. Atık miktarı azdır. Bir çok malzeme ile çalışılabilir. Yüzey pürüzlüğü problemi yaşanması ihtimal olduğundan, ince katmanlarla çalışmak gerekmektedir.

2.1.2.1. FDM

Ereyik yığma yöntemi olarak bildiğimiz FDM (Fused Deposition Modeling), eklemeli imalatın kullanımı yaygın olan yöntemlerindedir. 1990 yıllarında ticari olarak kullanımına başlanmıştır ve günümüzde de bir çok kullanıcıya hitap etmektedir (Crump 1992). Genel olarak FDM, ereyik halindeki malzemenin katman katman üst üste düşürülerek nesne oluşturma sürecidir. Şekil 2.4’de FDM yöntemiyle ilgili görsel paylaşılmıştır.



Şekil 2.3: FDM yöntemi ile üretim (Gavas vd. 2022).

Katmanlar halinde düşürülen malzemeler soğuyarak katılaşıyor, bir sonraki katman tekrar sıcak düştüğünden katmanlar arasında yapışma, birleşme gerçekleştirir (Mustapha ve Metwalli 2021). Baskı nozul ve tabla hareketleri ile 3 ekseninde (X, Y ve Z) gerçekleşmektedir. Bu sayede karmaşık tasarımlar tek seferde üretilebilmektedir. Özellikle prototiplemede sıkça tercih edilmektedir (Can vd. 2024). Kullanılan termoplastik veya kompozit malzemeye filament ismi verilmektedir. Genellikle filament çapları 1,75mm veya 2,85 mm olarak tercih edilmektedir. Ereyiğin aktığı kısım (nozül) çapları 0,4mm tercih edilmektedir, fakat farklı kalınlıklarda (0,8mm gibi) nozullar da mevcuttur. Bu yöntemde yüzey pürüzlülüğü dezavantaj oluşturmaktadır. Kullanım kolaylığı, sarf malzeme temini, maliyet ucuzluğu gibi sebeplerle FDM; otomotiv, havacılık, sağlık, tekstil gibi bir çok alanda tercih edilmektedir (Ümit, Başcı, ve Yamanoğlu 2021).

FDM yönteminde 3D yazıcının kabinli veya kabinsiz olması oldukça önemlidir. Üretilen malzemelerin polimer oluşundan dolayı, bazı filamentlerin yazdırma işlemi esnasında dışarıdan hava almaması gereklidir. Özellikle karışım polimerler nemi fazlaca malzeme içerisine hapsedmektedir. ABS gibi malzemelerin üretiminde kapalı kabinli yazıcılar tercih edilmelidir. Ereyik yığılma yönteminde baskı parametreleri üretilecek parçalar için oldukça önemlidir (Cojocarü vd. 2022). Her malzeme aynı parametrede üretilemez. Platform sıcaklığı, malzemenin tablaya tutunması için uygun seçilmelidir. Bazı malzemelerde tam anlamıyla tablaya yapışma gerçekleşemediğinden ekstra bir yapıştırıcı gerekmektedir. Oluşturulan geometri çıkıntılara sahip ise ürün baskısı yapılırken mutlaka destek eklenmesi gerekmektedir.

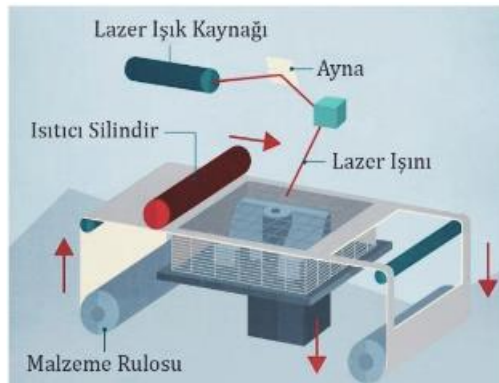
Karmaşık yapıdaki ürünler ve küçük hacimdeki parçaların üretiminde hassasiyet sınırlıdır (Sönmez, Kesen, ve Dalgıç 2018). İşleme alınacak tasarımın boyutlarına bağlı olarak üretim süresi uzamaktadır (Başçı ve Yamanoglu 2021). Üretimden sonra özellikle destek kullanıldıysa temizlik gerekmektedir. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında FDM tipi 3D yazıcı ve filamentleri ekonomiktir. Yedek parçaları ucuzdur ve kolay erişilebilir. Filament çeşitliliği fazladır, kullanımı basittir. Küçük hacimli olduklarından taşınabilirler. Hızlı prototiplemede çok sık tercih edilmektedir.

2.1.3. Sac laminasyon

Diğer yöntemlerden farklı olarak katı halindeki levhaların üst üste birleştirilip sonra kesilmesi işlemine verilen isimdir. Genellikle büyük boyutlu parçaların imalatında tercih edilir. İnce detaylı ürünlerde veya karmaşık tasarımlarda yüksek performans gösteremez.

2.1.3.1 LOM

Laminasyonlu nesne üretimi olarak bilinen bu yöntem , 1990'lı yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Bilinen en eski yaklaşıma sahiptir. Bu teknikte alt kısmı yapışkanlı malzeme ruloya sarılmış vaziyette kullanılmaktadır. Rulo olarak sarılmış olan malzeme (kağıt, metal), açılarak tabla üzerine serilir. Yapışkanlığı arttırmak amaçlı sıcak silindir ile tablaya serilmiş ürün üzerinden geçilir. Ürünler şeritler halinde kesilerek üst üste katmanlar şeklinde istiflenir. İşlem sırasında ürün yüksekliği arttıkça tabla aşağı yönde hareket eder. Şekil 2.5'de LOM teknolojisinin şematik görseli paylaşılmıştır.



Şekil 2.4: LOM yöntemi ile üretim (Gavas vd. 2022).

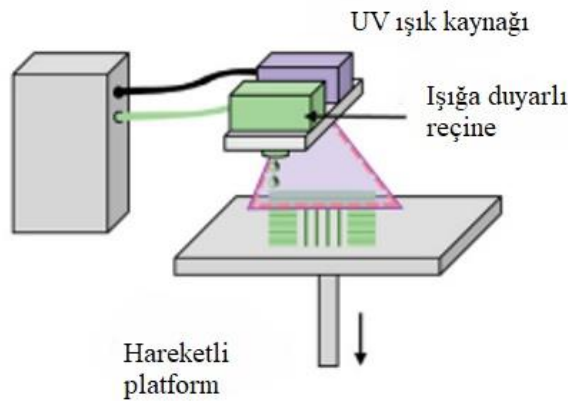
İstiflenmiş katmanlar ölçülerine göre bir tür lazer vasıtası ile kesilir. Ölçüler CAD dosyaları ile yöntem için yön gösterici olarak kullanılır (Gibson vd. 2015). Oluşturulacak geometri tamamlanana kadar bu işlem devam eder (Gibson vd. 2015). İşlemin her aşamasında ısıtılmış silindir ile ürün üzerinde gezinti işlemi devam eder ve platform daha iyi yapışma gerçekleştirmek için yükseltilir. Bu yöntem maliyet düşüklüğü, büyük parçaların üretiminin kolay olması gibi avantajlara sahiptir. Fakat fazla atık oluşumu ve karmaşık parçaların üretimi zorlaması dezavantajlar oluşturur (Udroiu ve Braga 2017).

2.1.4. Malzeme Püskürtme

Malzeme püskürtme yöntemi, sıvı reçinenin (fotopolimer) bir nozul vasıtasıyla yüzeye püskürtmesi prensibi ile üretim yapılması işlemine verilen isimdir. Yüksek çözünürlük ve renk seçenekleriyle özellikle prototiplemede tercih edilmektedir (Akgümüş Gök vd. 2023). Moda, mühendislik, mimarlık alanlarında oldukça tercih edilmektedir.

2.1.4.1. MJ/PJ (Çoklu püskürtme yöntemi)

Fotopolimer malzemenin püskürtülüp UV ışınları sayesinde katılaştırılarak yapılan üretim şeklidir. UV ışınları diğer eklemeli üretim yöntemlerinde olduğu gibi malzemeyi kürleştirmek için kullanılmaktadır (Wong ve Hernandez 2012). MJ (malzeme püskürtme) yönteminde fotopolimer ve balmumu kullanılırken PJ (polimer yönteminde) sadece fotopolimer kullanılmaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı yüksek çözünürlüktür (Baş, Yapıcı, ve İnanç 2022a). Şekil 2.6'da MJ ile üretim yönteminin şematik görseli paylaşılmıştır.



Şekil 2.5: MJ yöntemi ile üretim (Park vd. 2022).

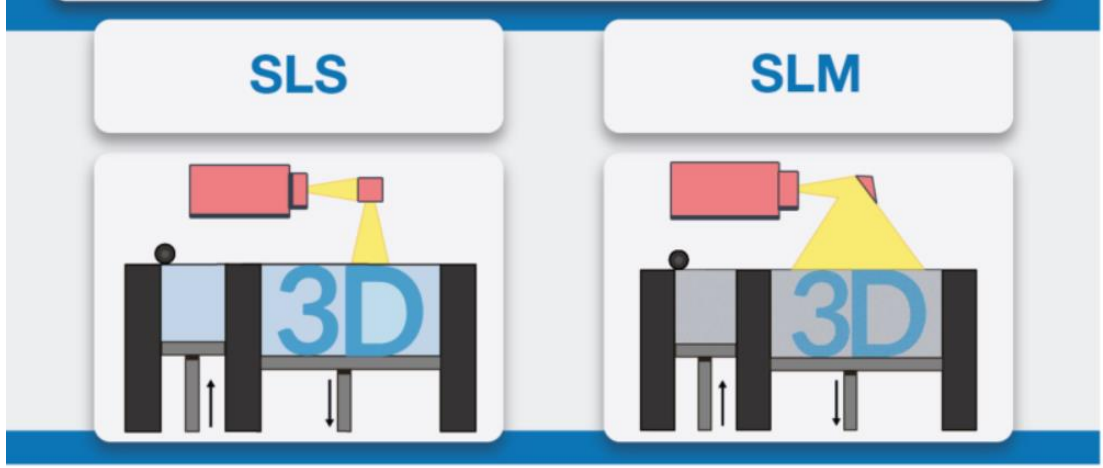
Bu yöntemde karmaşık yapıdaki geometrileri üretebilmek için jel malzemeden destek oluşturulur. Baskı sonrasında destek rahatlıkla üründen ayrılmaktadır. Baskı için iki eksen de hareket edebilen (X ve Y) başlıklar kullanıldığından, aynı anda birden çok ürün üretimi gerçekleştirilebilir. Oluşturulan ürünlerin mekanik özellikleri farklılık gösterebilmektedir (Cengiz 2024).

2.1.5. Toz yataklı eritme

Toz yataklı eritme (PBF), ismini üretim yönteminden almıştır. Sıklıkla dikkat isteyen ve hassas üretilmesi gereken malzemeler için tercih edilen eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntem platform üzerine serilen tozların lazer gibi bir kaynak ile katılaştırılması işlemidir. İnce tabaka halinde serilen tozlar katılaştırılıp süpürme işlemi gerçekleştirilir. Süpürülen tozlar bir sonraki üretimde kullanılabilir. Tüm katmanlar oluşturulduktan sonra soğuma gerçekleştirilir, 3 boyutlu bir nesne elde edilir (Karakılınç, Yalçın, ve Ergene 2019). Bu yöntemler mukavemet anlamında iyi sonuçlar veren ürünlerin elde edilmesini sağlar. Genellikle destek gerektirmez (Cengiz 2024).

2.1.5.1. SLS/ SLM (Seçici lazer sinterleme- ergitme)

SLS, sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. Bu sistem hazne içine konumlandırılmış olan toz malzemenin, platform üzerine serilmesi ile başlar. Geometrisi önceden belirlenen nesne bilgisayar ile makineye aktarılır. Verilen veriler ile serilmiş olan toz malzeme katman oluşturulacak şekilde sinterlenir (Aydınlı 2023). Sinterlenme hareket kabiliyeti olan aynaya lazer ışını gönderilmesiyle başlar. Lazer sinterleme işlemi ürün tamalanana kadar her katmanda devam eder. Her katman sonucunda süpürme işlemi gerçekleştirildiğinden fazla toz malzeme bir sonraki üründe veya katmanda da kullanılabilir. Desteklere gerek olmadığından ve katmanlar kontrollü ilerlediğinden dolayı yüzey pürüzlülüğü konusunda iyi sonuçlar elde edilir. SLS nispeten hızlı sayılabilir ve genellikle polimer tozları tercih edilir (Karakılınç vd. 2019). SLS, genellikle sağlık sektöründe tercih edilmektedir (Bozkurt, Gülsoy, ve Karayel 2021). Şekil 2.7’de SLS ve SLM sistemlerin temsili görselleri verilmiştir.

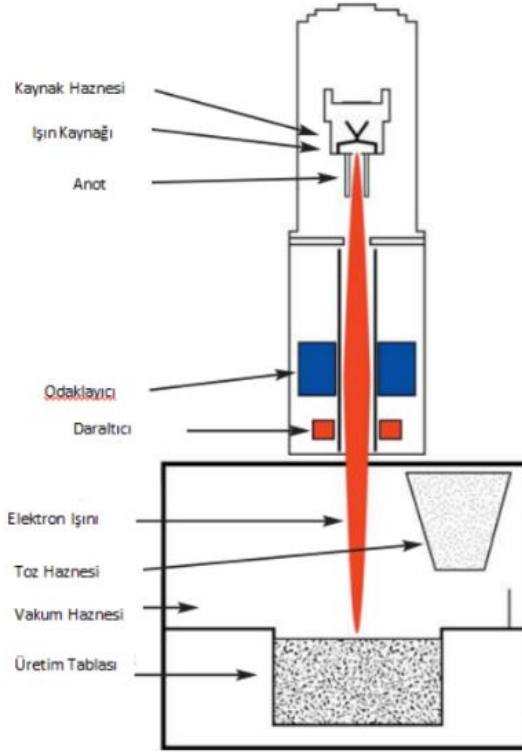


Şekil 2.6: SLS ve SLM sistemleri (Pick 3D Printer t.y.)

SLM sistemi ise SLS'den farklı olarak metal tozları ile üretim yapma şeklindedir. Üretim yöntemleri hemen hemen aynıdır (Dedeakayoğulları vd. 2020). Metal malzeme tozları tabla üzerine serilir ve lazer yardımı ile eritme işlemi gerçekleştirilir. Yapılan bu işlem ürün tamamlanana kadar devam eder ve ürün tamamlandığında soğutma gerçekleştirilir. SLS'de olduğu gibi fazla toz temizlenir, bir sonraki işlemde tekrar kullanılabilir. Bu yöntemler türdeşleri ile karşılaştırıldığında daha pahalı yöntemlerdir.

2.1.5.6. EBM (Elektron ışınli ertitme)

Metal ve eklemeli imalat konusunda adını sıklıkla duyduğumuz EBM, metal tozlarının elektron ışınları sayesinde katılaştırılarak malzeme üretiminin gerçekleştirildiği yöntemdir. Önceden ısıtılmış olan metal tozları, vakumlanarak (1000°C) hareket kabiliyetine sahip tabla üzerine serilir. Bu toz ürün elektron yağmuruna tutularak ortama 0,1mm kalınlığında katılmış katmanları oluşturur. Parça geometrisi tamamlanana kadar tozlar katılaştırılır ve platform aşağı doğru hareket eder. Bu işlem defalarca kendini tekrar eder (Gavas vd. 2022). Şekil 2.8'de EBM sistemini anlatan bir görsel paylaşılmıştır.



Şekil 2.7: EBM sistemi (Anonim t.y.).

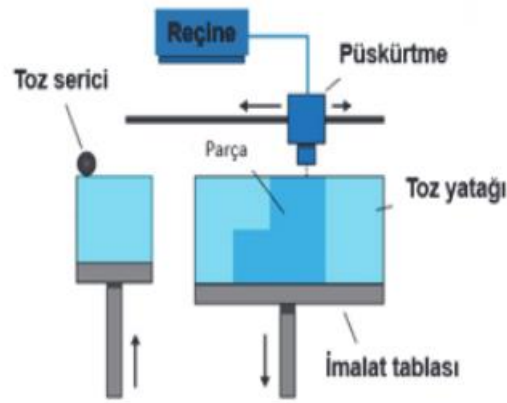
Bu yöntem özellikle yüksek mukavemet gerektiren malzemeler için tercih edilmektedir. Yüksek toleranslı ve tek seferde malzeme çıkartabilmesi sayesinde bir çok sektör alanında kullanımı görülmektedir (Anonim t.y.-b). EBM için kullanılan malzemenin iletkenliği önemlidir, bu sebep ile sadece metal parçalarının üretiminde kullanılabilir. Yapı olarak ailedeki diğer yöntemlere oldukça benzemektedir. Bu yöntemi diğerlerinden ayıran en önemli özelliği: Elektron tabancası ile elektron ile katılaştırma sistemidir. Genellikle sağlık alanında (implant), havacılık ve türbin üretimlerinde tercih edilir (Özer 2020).

2.1.6. Yapıştırıcı püskürme

Yapıştırıcı püskürme, ince toz malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirildiği bir eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntemde, toz yatağına baskı kafası tarafından hassas bir şekilde yapıştırıcı püskürtülür (Miyanaji 2018). Parça şekli bu şekilde oluşturulur. Yapıştırma sonrası ürün yeşil mukavemet olarak adlandırılan sınırlı bir dayanıklığa sahip olur. Dayanımı arttırmak ve ürünün nihai formunu korumak amacıyla fırınlama ya da sinterleme işlemlerine gerek duymaktadır. Yapıştırıcı püskürme yöntemi destek hattı gerektirmez (Baş, Yapıcı, ve İnanç 2022b).

2.1.6.1. BJ (Bağlayıcı püskürtme)

Adını daha çok metal, kum ve seramik malzemelerin üretiminde duyduğumuz bağlayıcı püskürme, eklemeli imalat yöntemidir. Bu yöntem toz malzemenin üstüne sıvı yapıştırıcı püskürterek ürün imal etmemize imkan sağlar (Aslan ve Can 2023). Genellikle metal prototiplemede kullanılan yöntem, seramik polimer gibi malzemeleri de üretimde kullanmaya imkan sağlar. Üretim malzemenin tablaya (toz yatağı) ince bir katman halinde serilmesi ile başlar. Baskı kafası tabla üzerine yapıştırıcı püskürtür. Yapıştırıcı sıvı reçine, çözelti veya organik bir yapıştırıcı olarak hammaddeye göre değişiklik göstebilir. Toz serme ve yapıştırıcı püskürtme işlemi ürün tam formunu kazanana kadar devam eder. Parça katmanları bittiğinde ürün tozlardan temizlenir (Gürgen vd. 2020). Geometri tamamlandığında ürün yeşil mukavemet halindedir. Şekil 2.9'da BJ yönteminin çalışma prensibi ile alakalı görsel paylaşılmıştır.



Şekil 2.8: BJ yöntemi (Gavas vd. 2022).

Parça dayanımını arttırmak için sinterleme, fırınlama ve infiltasyon işlemleri gerçekleştirilir. BJ yönteminde ince katmanlar ile çalışıldığında çözünürlük artmaktadır fakat işlem süresini uzatmaktadır (Erickson ve Chmielus 2023). Kullanılan toz malzeme eritilmediğinden enerji ihtiyacı düşüktür . Destek kullanımı gerekmediğinde içi boş malzemeleri bile oldukça hızlı üretebilir. Ürün bitiminde yüzey pürüzleri nedeniyle ek işlem ister. Genellikle döküm, sanat ve dişçilik sektöründe kullanılmaktadır (Li vd. 2020).

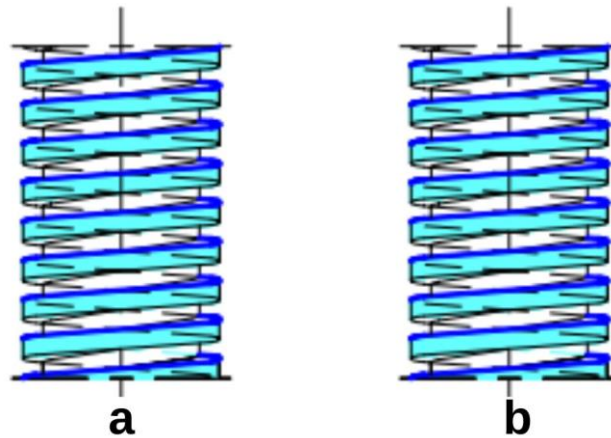
2.2. Bağlantı Elemanları

Yapısal uygulamalarda, mekanik sistemlerin sökülebilir ve sökülemez (kalıcı) birleştirilmesinde bağlantı elemanları büyük rol oynamaktadır. Kolay montaj ve güvenli birleştirme en önemli avantajlarından. Bu elemanlar yüksek hassasiyet, tolerans, dayanım gerektirmektedir. Üretimi için talaşlı imalat, soğuk ve sıcak dövme tercih edilmektedir. Bu yöntemlerden farklı olarak talaşlı imalat (CNC torna) ile de üretim yapılmaktadır fakat diğer yöntemlere göre daha karmaşıktır (Gökçe 2020; Kayır, Güneş, ve Demirer 2018). Boyutları küçük malzemeler için soğuk dövme, hacim olarak büyük parçaların üretiminde sıcak dövme yöntemi tercih edilmektedir. Genellikle imalat prosesinde çelik malzeme tercih edilir. Bağlantı elemanları kendi içerisinde çözülebilen ve çözilemeyen olarak iki gruba ayrılır. İsimlendirmedeki asıl amaç montaj veya birleşme gerçekleştiğinde oluşan yeni ürünün zarar verilmeden ayrılıp ayrılamayacağı ile alakalıdır. Çözülebilen elemanlar cıvata, pim şeklindeyken çözilemeyen elemanlar kaynak, perçin olarak örneklendirilebilir. Korozyonu ve yüzeyin aşınmasını önlemek adına fosfatlama, galvanizleme gibi işlemler uygulanmaktadır (German Institute for Standardization 2011; Kılıçaslan ve İnce 2017). İnşaat, otomotiv, havacılık, deniz, mobilya gibi oldukça yaygın bir kullanım yelpazesine sahiplerdir (Efe ve İmirzi 2007). En çok tercih edilenleri; pim-çivi, somun-cıvata, vida ve perçindir.

Bağlantı elemanları kritik bir mühendislik elemanıdır. Özellikle cıvata ve somunlarda sıkma torku, delik toleransı bağlantının kalitesini doğrudan etkilemektedir. Cıvata dayanımı, performansı ve ömrü arasında ciddi bir ilişki bulunmaktadır (Jiang vd. 2025). Cıvata ve somunlarda taşıma kapasitesi oldukça önemli bir değerdir. Uygulanacak her sisteme uygun, kolay içerik sağlanabilmesi için bağlantı elemanları ile ilgili kabul gören standartlar oluşturulup kabul edilmiştir. Başlıca ilgili standartlar DIN, ISO ve ASTM'dır (ASTM International 2015; International Organization for Standardization 2013). ISO standartlarında cıvata ve somunlar Metrik (M) olarak standart hale getirilmiştir. Standart kapsamında cıvata ve somunlar kullanılan alanlara göre baş kısmı gibi özelliklerinde değişiklik göstermektedir. Nominal çapları standart içinde aynıdır.

2.2.1. Cıvatalar ve somunlar

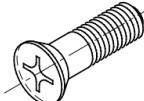
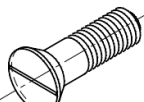
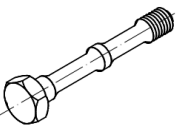
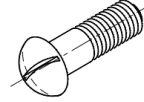
Cıvatalar, çözülebilir bağlantı elemanları arasında kullanımı en yaygın üründür. Günlük yaşantımızda dahi sıklıkla tercih edilmektedir (Akpınar 2016). Silindirik mil gövdenin üzerine vida çekilerek oluşturulur. Cıvatanın baş kısmının, her standart için şekli ve ölçüsü farklılık göstermektedir. Genellikle cıvata ve vida ürünleri karıştırılmaktadır. Baş kısmı anahtar ile sıkılıp gevşetilebilen bağlantı elemanı cıvatadır. Cıvatalar ile bağlantı sağlanırken bağlantıyı güvenilir hale getirmek için somun kullanımı gerektirirler. Tornavida gibi unsurlar kullanarak bağlantı sağlanan elemanlar ise vidadır. Vidalar bağlantı sonrası somuna ihtiyaç duymazlar. Cıvatalar genellikle çelik malzemeden üretilmektedirler (Yazıcıoğlu ve Yazıcıoğlu 2020). Endüstride kullanım alanı ve montaj yapılacak ürünlere göre malzemeleri değişiklik göstermektedir (Çoban Özkan vd. 2016). Cıvatalar üzerlerinde oluşacak stresi (yükü) dağıtacak şekilde üretilirler. Bu ürünler için montajlanacakları alana göre uygun yapıda ve boyutta seçilmeleri oldukça önemlidir. Cıvatalar çekme, kesme kuvvetleri gibi aksel yüklerine maruz kalmaktadır. Cıvatalarda çekme kuvvetinin oluşması için eksene paralel ya da paralele yakın kuvvetler oluşmalıdır (Ulupınar 2022). Kesme kuvveti için cıvata eksenine dik ya da dik sayılabilecek kuvvetler etki etmelidir (Ulupınar 2022). Bu sebeple optimum sıkma kuvveti yakalanması için tork ve gerilme ilişkisi önemlidir. Cıvatalar helis yönüne göre sağ ve sol olarak ayrılmaktadır (Kutay 2005). Helis yönü cıvatanın dış yönüdür. Bu yön cıvata bağlantısını hangi yöne sıkmamız gerektiği hakkında bilgi vermektedir. Şekil 2.10'da sağ ve sol helis dış yönü görseli verilmiştir.



Şekil 2.9: Cıvata helis yönleri. A: Sağ helis. B: Sol Helis (Kutay 2005)

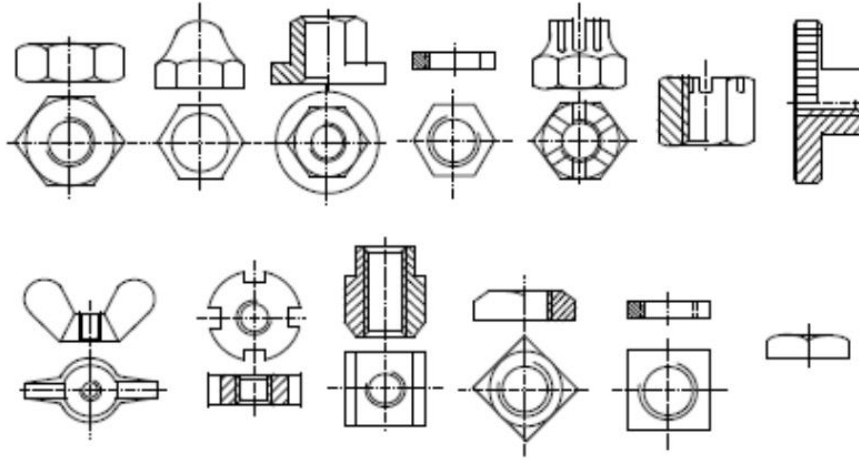
Helis yönü genellikle sağ olarak tercih edilmektedir. Sağ helis yönlü cıvatalar saat yönünde döndürülerek sıkılmaktadırlar. Sol helis yönlü cıvatalar saat yönünün tersi yönüne çevrilerek sıkılırlar. Emniyetli bağlantılar gerçekleştirmek için cıvatalar uygun helis yönüne göre sıkılıp gevşetilmelidir. Cıvatalar kendi içerisinde metrik, whitworth vidası, testere dişli, yuvarlak dişli, trapez olarak ayrılmaktadır. Cıvatalar kullanım alanları, baş yapısı gibi ölçütlere göre sınıflandırılmaktadır. Tablo 2.1’de farklı tüde cıvata yapıları paylaşılmıştır.

Tablo 2.1: Farklı türde cıvata yapıları

| Cıvata Adı | Görsel | Kullanım Alanı |
|----------------------------|---|---|
| Altı köşe şaftlı |  | Ağır sanayi, hareketli eleman montaj, çelik konstrüksiyon |
| İmbus şaftlı |  | CNC ve takım tezgahları, Robotlar, motor parçaları, |
| Havşa başlı yıldız yarıklı |  | Mobilya, elektrik, havacılık, |
| Havşa başlı yarıklı |  | Dekorasyon, elektrik, ahşap uygulamalar, otomotiv |
| Saplamalar |  | Makine ve edüstriyel alanlar, denizcilik |
| Altıköşe esnek |  | Otomotiv, ağır sanayi, demir yolu ve raylı sistemler |
| İmbus esnek |  | Havacılık ve uzay, denizcilik, Rüzgâr türbinleri |
| Havşa başlı imbus |  | İnşaat, Takım tezgâhları, endüstriyel uygulamalar |
| Mercek başlı yarıklı |  | Mobilya, dekorasyon, elektronik cihazlar |

Somun genellikle ana bağlantı elemanını sıkmak veya sabitlemek amacıyla kullanılan elemandır. Somunun iç kısmında kılavuz çekilidir. Bu sayede kilit görevi

de görmektedir. Titreşimli ortamlarda sökülmei engellemektedir. Somunlar tekrar tekrar sökülebilirler. Şekil 2.11’de somun çeşitleri paylaşılmıştır.



Şekil 2.10: Somun çeşitleri

2.2.1.1. Metrik cıvatalar ve somunlar

Metrik cıvatalar ve somunlar kullanımı en yaygın olanlardır. Montaj ve birleştirme işleminde sıkça tercih edilirler. Metrik cıvata ve somunlar ISO standartları ölçülerinde imal edilirler. Ölçü birimleri mm’dir ve uç açıları 60°’dir. Metrik cıvatalar mukavemet değerlerine (8.8 gibi) göre kendi içlerine ayrılmaktadır. Bu ürünler galvaniz, kadminyum ve çinko gibi kaplamalar ile korezyona karşı dirençleri arttırılır. Şekil 2.12’de Metrik cıvata tablosu paylaşılmıştır.

Tablo 2.2: Metrik ölçüler.

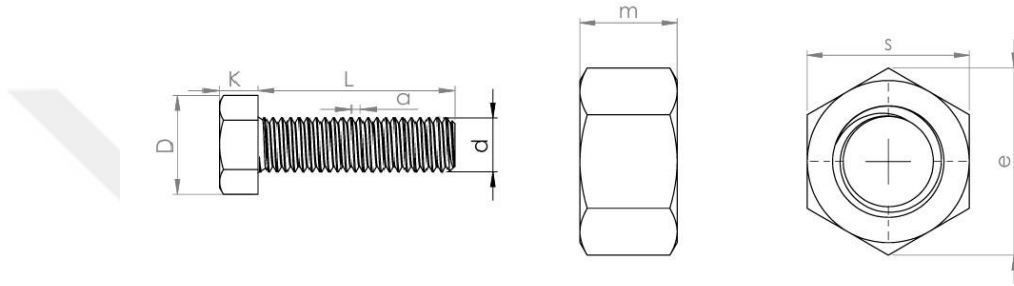
| Sıra | Adım | Böğür çapı d2=D2 | Diş dibi çapı Dış vida d3 | Diş dibi çapı İç vida D1 | Diş yükseklği Dış vida h3 | Diş yükseklği İç vida H1 | Yuvarlaklık R |
|------|------|---------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------|
| M1 | 0,25 | 0,638 | 0,693 | 0,729 | 0,153 | 0,135 | 0,036 |
| M2 | 0,4 | 1,74 | 1,509 | 1,567 | 0,245 | 0,217 | 0,058 |
| M2,5 | 0,45 | 2,06 | 1,948 | 2,013 | 0,276 | 0,244 | 0,065 |
| M3 | 0,5 | 2,675 | 2,387 | 2,459 | 0,307 | 0,271 | 0,072 |
| M3,5 | 0,6 | 3,11 | 2,764 | 2,85 | 0,368 | 0,325 | 0,087 |
| M4 | 0,7 | 3,545 | 3,141 | 3,242 | 0,429 | 0,379 | 0,101 |
| M4,5 | 0,75 | 4,013 | 3,58 | 3,688 | 0,46 | 0,406 | 0,108 |
| M5 | 0,8 | 4,48 | 4,019 | 4,134 | 0,491 | 0,433 | 0,115 |
| M6 | 1 | 5,35 | 4,773 | 4,917 | 0,613 | 0,541 | 0,114 |
| M8 | 1,25 | 7,188 | 6,466 | 6,647 | 0,767 | 0,677 | 0,18 |
| M10 | 1,5 | 9,026 | 8,16 | 8,376 | 0,92 | 0,812 | 0,217 |
| M12 | 1,75 | 10,863 | 9,853 | 10,106 | 1,074 | 0,947 | 0,253 |

Tablo 2.2 (devamı): Metrik ölçüler.

| Sıra | Adım | Bögür çapı d2=D2 | Diş dibi çapı Diş vida d3 | Diş dibi çapı İç vida D1 | Diş yükseklği Diş vida h3 | Diş yükseklği İç vida H1 | Yuvarlaklık R |
|------|------|---------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------------|
| M14 | 2 | 12,701 | 11,546 | 11,835 | 1,227 | 1,083 | 0,289 |
| M16 | 2 | 14,701 | 13,546 | 13,835 | 1,227 | 1,083 | 0,289 |
| M18 | 2,5 | 16,376 | 14,933 | 15,294 | 1,534 | 1,353 | 0,361 |
| M20 | 2,5 | 18,376 | 16,933 | 17,294 | 1,534 | 1,353 | 0,361 |
| M22 | 2,5 | 20,376 | 18,933 | 19,294 | 1,534 | 1,353 | 0,361 |
| M24 | 3 | 22,051 | 20,319 | 20,752 | 1,84 | 1,624 | 0,433 |
| M27 | 3 | 25,051 | 23,319 | 23,752 | 1,84 | 1,624 | 0,433 |
| M30 | 3,5 | 27,727 | 25,706 | 26,211 | 2,147 | 1,894 | 0,505 |
| M33 | 3,5 | 30,727 | 28,706 | 26,211 | 2,147 | 1,894 | 0,505 |
| M36 | 4 | 33,402 | 31,093 | 31,67 | 2,454 | 2,185 | 0,577 |
| M39 | 4 | 36,402 | 34,093 | 34,67 | 2,454 | 2,165 | 0,577 |
| M42 | 4,5 | 39,077 | 36,479 | 37,129 | 2,76 | 2,436 | 0,65 |
| M45 | 4,5 | 42,077 | 39,479 | 40,129 | 2,76 | 2,436 | 0,65 |
| M48 | 5 | 44,752 | 41,866 | 42,587 | 3,067 | 2,706 | 0,722 |
| M52 | 5 | 48,752 | 45,866 | 46,587 | 3,067 | 2,706 | 0,722 |

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Test numuneleri 3 farklı malzemeden üretilmiştir. Deneyler için M12 cıvata ve somun tercih edilmiştir. Şekil 3.1’de M12 cıvata ve somun standart ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3.1. ISO standarlatında cıvata ve somun.

L= 40mm

K=10mm

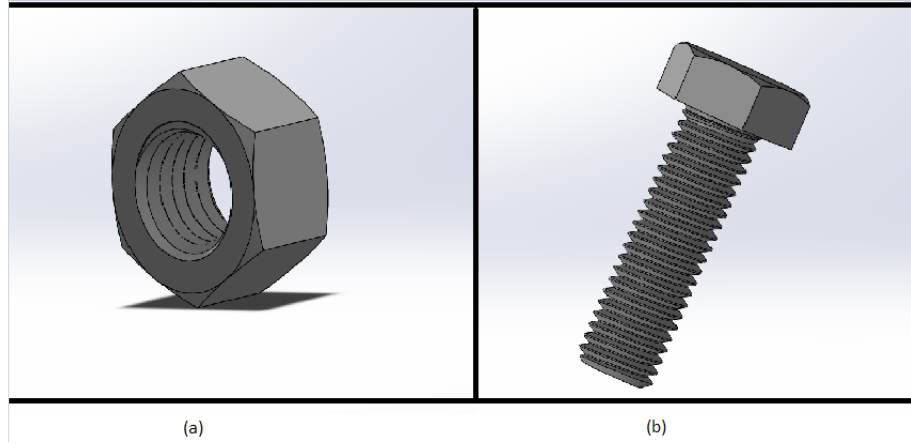
D=21mm

e=21mm

m=10mm

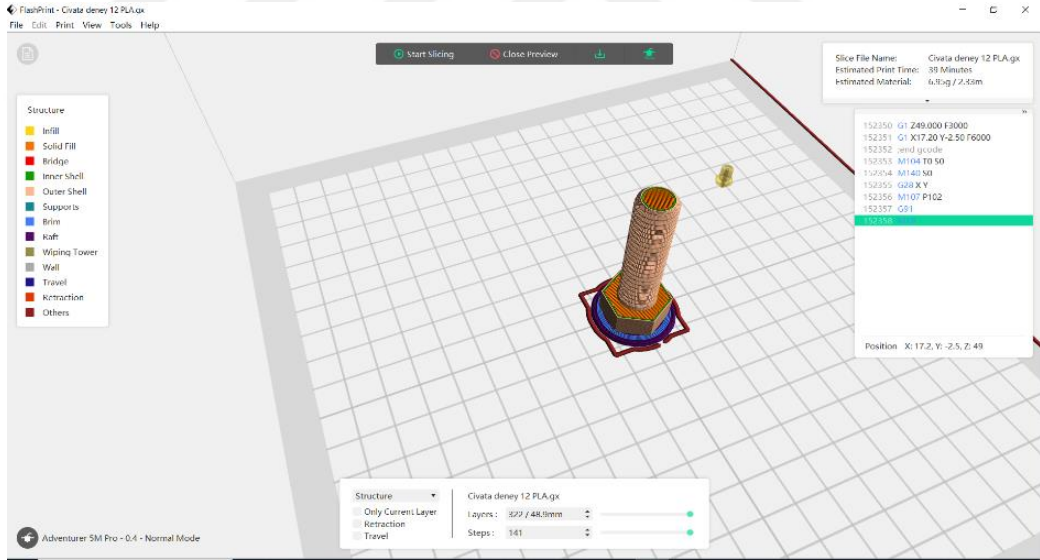
s=21mm

Bağlantı elemanları Solidworks programı ile tasarlanmış olup (Şekil 3.2), stl uzantısı kaydedilerek Flashprint programı ile g kodlarına çevrilip, makinede baskıya alınmıştır.

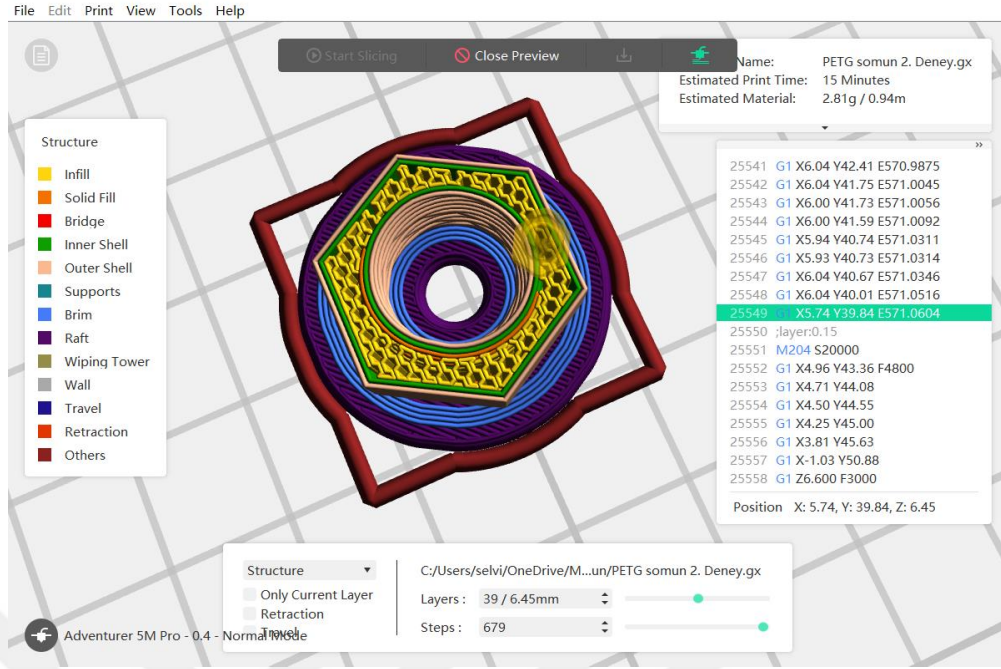


Şekil 3.2: M12 somun (a) ve cıvata (b) katı tasarımları.

Üretilen cıvata ve somun elemanlarında bal peteği yapı tercih edilmiştir. Bal peteği yapı ürün üzerinde oluşan darbe kuvvetini geniş bir alana yayarak, daha rijit bir enerji emilimi göstermektedir. Bunların yanı sıra az malzeme ile fazla dayanım göstermektedir (Özmen, Sürmen, ve Sezgin 2023) (Kaveloğlu vd. 2022). Şekil 3.3’de cıvatanın, Şekil 3.4’de somunun Flashprint programındaki görüntüleri paylaşılmıştır.



Şekil 3.3. Flashprint programında cıvata görünümü.



Şekil 3.4. Flashprint programında somun görünümü.

3.1. Materyal

M12 cıvata ve somun PLA, ABS ve PETG malzemeleri kullanılarak Flasforge Adventurer 5M Pro 3D yazıcı ile üretilmiştir. Kullanılan malzemeler termoplastik polimerlerdir. Üretim her parametre için özdeş olacak şekilde, 3 tekrarlı gerçekleştirilmiştir. 15 parametre ve 3 deney için toplamda M12 ölçülü 270 cıvata, 135 adet somun üretilmiştir. Bu ürünlere sırasıyla 135 çekme dayanımı testi, 135 kayma dayanımı testi ve somunlar için 135 diş dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları Minitab programı, cevap yüzey metodu ile incelenmiştir. Gerilme , % uzama grafikleri paylaşılmıştır.

3.1.1. PLA

Biyoplastik denilince akla gelen malzemelerden olan PLA (polilaktik asit), günümüzde oldukça tercih edilmektedir. PLA malzemesinin karbon ayak izinin türdeşlerine göre düşüktür ve çevre dostudur. Petrol türevlerinden üretilmiş olan termoplastiklere göre oldukça çok tercih edilmektedir (Vyavahare vd. 2020).

Farklı renk skalası, düşük büzülme oranı, düşük sıcaklıklarda yazdırılabilmesi, deformasyonunun düşük olması her kullanıcı (profesyonel ve amatör) için cazip kılar

(Günay vd. 2020). Kullanım alanı oldukça yaygındır. Özellikle havacılık, otomotiv gibi sektörlerde hızlı baskı alınmasından ve maliyeti düşürdüğünden dolayı sıklıkla kullanılmaktadır. Termoplastik yapıda bir polyester olup, yenilenebilen biyolojik unsurlardan (nişasta) üretilmektedir. İçeriği sayesinde gıda ve ambalaj sektöründe oldukça çok tercih edilmektedir. PLA, her kullanıcı için kullanımı tercih edilen, ağırlıkça orta yoğunluğa sahip bir malzemedir (Sedlak vd. 2023). Kullanımı fazla tercih edilmesine karşın doğru parametreler kullanılmadığında her malzemede olduğu gibi uygun sonuçlar elde edilemez. Sıcaklığa karşı duyarlılığı fazladır ve kırılğan bir yapıdadır. Yapılan çalışmada PLA malzemesi için sabit ve değişken parametreler mevcuttur. PLA malzemesi için değişken deney parametreleri Tablo 3.1’de paylaşılmıştır.

Tablo 3.1. Değişken PLA deney parametreleri.

| Sıra | Katman Yüksekliği | Nozul sıcaklığı | Bindirme Oranı |
|------|-------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 0,2 | 220 | 10 |
| 2 | 0,15 | 230 | 20 |
| 3 | 0,15 | 220 | 15 |
| 4 | 0,15 | 210 | 10 |
| 5 | 0,15 | 220 | 15 |
| 6 | 0,1 | 210 | 15 |
| 7 | 0,2 | 220 | 20 |
| 8 | 0,1 | 220 | 20 |
| 9 | 0,1 | 220 | 10 |
| 10 | 0,2 | 230 | 15 |
| 11 | 0,2 | 210 | 15 |
| 12 | 0,15 | 220 | 15 |
| 13 | 0,1 | 230 | 15 |
| 14 | 0,15 | 210 | 20 |
| 15 | 0,15 | 230 | 10 |

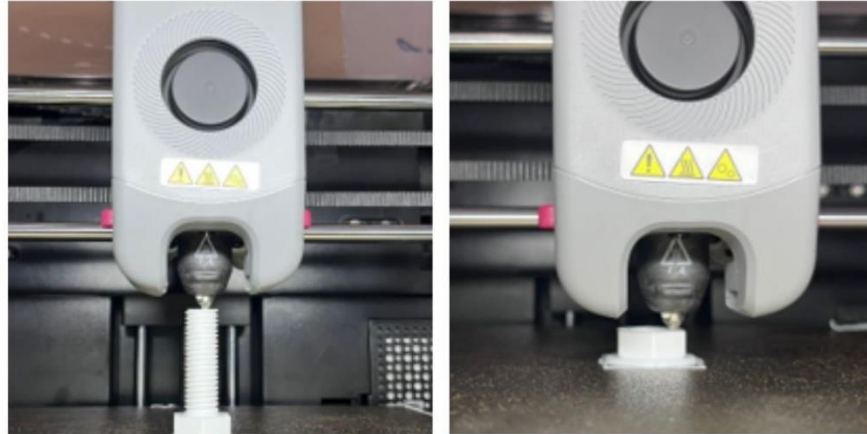
Değişken parametreler dışında PLA malzemesi için bazı parametreler sabit tutulmuştur. Filament çapı 1.75mm, nozul çapı 0,4mm’dir. Tabla sıcaklığı 65°C, baskı hızı 60 mm/s, gezinti hızı 80mm/s ve duvar sayısı 2’dir. Çalışma kapsamında Porima marka PLA malzeme kullanılmıştır. Şekil 3.5’de civatanın üretim anından görsel paylaşılmıştır.



Şekil 3.5. PLA numune görseli.

3.1.2. ABS

Adını eklemeli imalatı sıkça duyduğumuz ABS (Akrilonitril Bütadien Stiren), özellikle FDM yönteminde çokça tercih edilmektedir. İsmi içerdiği bileşimin baş harflerinden alan bu polimerde ; Akrilonitril termal ve kimyasal direnci artırırken, Bütadien esneklik katmaktadır. Stiren sertlik verirken malzemeye parlaklık da katmaktadır (Prof. Dr. Şahin 2022). Şekil 3.6’da baskı işlemi anından görsel paylaşmıştır.



Şekil 3.6: ABS numune görseli.

Oldukça farklı renk gaması olan bu malzeme genellikle yüksek yazdırma sıcaklıkları için idealdir. Ortalama olarak FDM yöntemi için 210°C-250°C uygun yazdırma sıcaklıklarıdır. Maliyeti düşüktür, oldukça hafiftir ve dayanımı yüksektir (Gavas vd. 2022; Koçak, Bayraklılar, ve Ülker 2024). Yapılan çalışmada ABS malzemesi için sabit

ve değişken parametreler mevcuttur. Değişken deney parametreleri Tablo 3.1’de paylaşılmıştır.

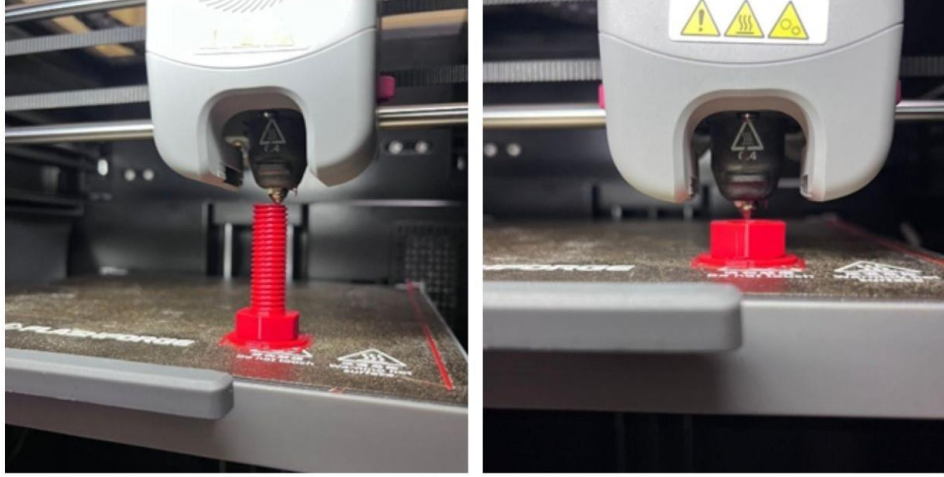
Tablo 3.2. Değişken ABS parametreleri.

| Sıra | Katman Yüksekliği | Nozul sıcaklığı | Bindirme Oranı |
|------|-------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 0,2 | 235 | 10 |
| 2 | 0,15 | 245 | 20 |
| 3 | 0,15 | 235 | 15 |
| 4 | 0,15 | 225 | 10 |
| 5 | 0,15 | 235 | 15 |
| 6 | 0,1 | 225 | 15 |
| 7 | 0,2 | 235 | 20 |
| 8 | 0,1 | 235 | 20 |
| 9 | 0,1 | 235 | 10 |
| 10 | 0,2 | 245 | 15 |
| 11 | 0,2 | 225 | 15 |
| 12 | 0,15 | 235 | 15 |
| 13 | 0,1 | 245 | 15 |
| 14 | 0,15 | 225 | 20 |
| 15 | 0,15 | 245 | 10 |

Baskı sırasında nozul sıcaklığı, katman yükseliği ve bindirme oranı parametreleri üç farklı şekilde kombinasyonlanmıştır. Baskı sırasında katman sayısı (2), tabla sıcaklığı (100°C), gezinti hızı 60mm/s ve gezinti 80mm/s değerleri sabit tutulmuştur. Kullanılan filament Porima markasına ait beyaz renk ABS filamenttir. Filament çapı 1.75 mm’dir. Baskı işlemi sırasında yapıştırıcı kullanılmamıştır. İşlem anından görüntü Şekil 3.6’da paylaşılmıştır.

3.1.3. PETG

PETG; Polietilen Tereftalat PET, daha çok pet şişe üretiminde tercih edilen plastik yapıdaki malzemenin glikol (G) ile birleştirilerek oluşturulan termoplastik bir polimerdir (Prof. Dr. Şahin 2022). Renk durumu incelendiğinde şeffaf ve optik baskılarda ihtiyaç karşılamaktadır. Dış mekan uygulamaları için uygundur. Genellikle medikal alanda tercih edilmektedir (Haffner vd. 2018). Şekil 3.7’de baskı işlemi anından görsel paylaşılmıştır.



Şekil 3.7: PETG malzemesi numuneleri

Mukavemet açısından incelendiğinde PETG, PLA ve ABS arasında kalmaktadır. PETG'nin PLA malzemesinden dayanımı düşüktür fakat ABS kadar da esnek bir malzeme değildir. Kırılmadan esneyebildikleri gözlemlenmiştir. Bu sebeple kolay yazdırılır. Yumuşama sıcaklığı ortalama 80°C olup, 220°C-250°C sıcaklıklar arasında baskı alınmalıdır (Subbarao vd. 2021). PLA gibi biyoplastik değildir fakat geri dönüşümü sağlanabilir. ABS kadar yüksek sıcaklığa çıkamaz, PLA kadar düşük sıcaklıklarda kullanılamaz. Deney sırasında değiştirilen parametreler Tablo 3.3'de paylaşılmıştır.

Tablo 3.3. Değişken PETG parametreleri.

| Sıra | Katman Yüksekliği | Nozul sıcaklığı | Bindirme Oranı |
|------|-------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 0,2 | 240 | 10 |
| 2 | 0,15 | 250 | 20 |
| 3 | 0,15 | 240 | 15 |
| 4 | 0,15 | 230 | 10 |
| 5 | 0,15 | 240 | 15 |
| 6 | 0,1 | 230 | 15 |
| 7 | 0,2 | 240 | 20 |
| 8 | 0,1 | 240 | 20 |
| 9 | 0,1 | 240 | 10 |
| 10 | 0,2 | 250 | 15 |
| 11 | 0,2 | 230 | 15 |
| 12 | 0,15 | 240 | 15 |
| 13 | 0,1 | 250 | 15 |
| 14 | 0,15 | 230 | 20 |
| 15 | 0,15 | 250 | 10 |

Deney sırasında Porima marka, 1,75mm çapında filament kullanılmıştır. Tabla sıcaklığı 75°C'dir. Baskı hızı 60mm/s ve gezinti hızı 80mm/s'dir. Duvar sayısı 2'dir.

3.2. Deneyler

PLA, ABS ve PETG malzemelerden üretilmiş olan M12 cıvatalara çekme ve kesme testleri, somunlara aksenal yük sıyırma testi uygulanmıştır. İlgili testler Shimadzu 50 kN makine ile gerçekleştirilmiştir. şekil 3.8'de test makinesine ait görsel paylaşılmıştır. Makine ayarları ve veri girdi ıktıları için Trapeziumx programı kullanılmıştır. Testlerden önce bağlanılan her parça için sıfırlama yapılmıştır. er adet özdeş olarak üretilen numuneler için ayrı ayrı testler yapılmıştır. Test sonuçları ortalaması alınarak paylaşılmıştır. şekil 3.8'de çekme anından testi esnasında çekilen bir görsel verilmiştir.



şekil 3.8: Test makinesi.

Testler sırasında tasarlanan kesme ve çekme aparatları ile deney numuneleri arasına M12 pul eklenmiştir. Aparatlar St 37 malzemesinden lazer kesim ile imal edilmiştir. Aparat kalınlığı 15mm'dir.

3.2.1. Cıvata çekme dayanımı ve somun diş sıyırma testi

Çekme dayanımı, diğer bir adıyla gerilim testi en yaygın kullanılan mekanik testlerdendir. Aynı ekseninde zıt yönde malzemeler çekme kuvvetine maruz bırakılarak kopma öncesi ve kopma kuvvetlerini, uzama gibi değerlerini paylaşır. Test sadece statik özellikler için değil, kalite gibi alanlarda da destek olmaktadır. Test ile beraber bulunan statik sonuçlar, süneklik, mukavemet, akma dayanımı, poisson oranı ve young modülü ve rijitlik değerlerine ulaşılır. Test iki çene arasına numuneler için yerleştirilen aparatlara cıvatalar bağlanarak gerçekleştirilir. Birim alana etki eden kuvvetin hesaplanması için Denklem 3.1 kullanılır. Bağlanılan numuneler kopana kadar çekme işlemi devam eder.

$$\sigma = \frac{P}{A_o} \quad (3.1)$$

σ = Gerilme (Pa)
P= Kuvvet (N)
Ao= Alan (mm²)

Program çekme sonlanana kadar ki süreçteki maksimum kuvvet ve uzama miktarını takip etmektedir. Kuvvet altındaki malzemenin şekil değiştirme oranı hesabı Denklem 3.1'de paylaşılmıştır.

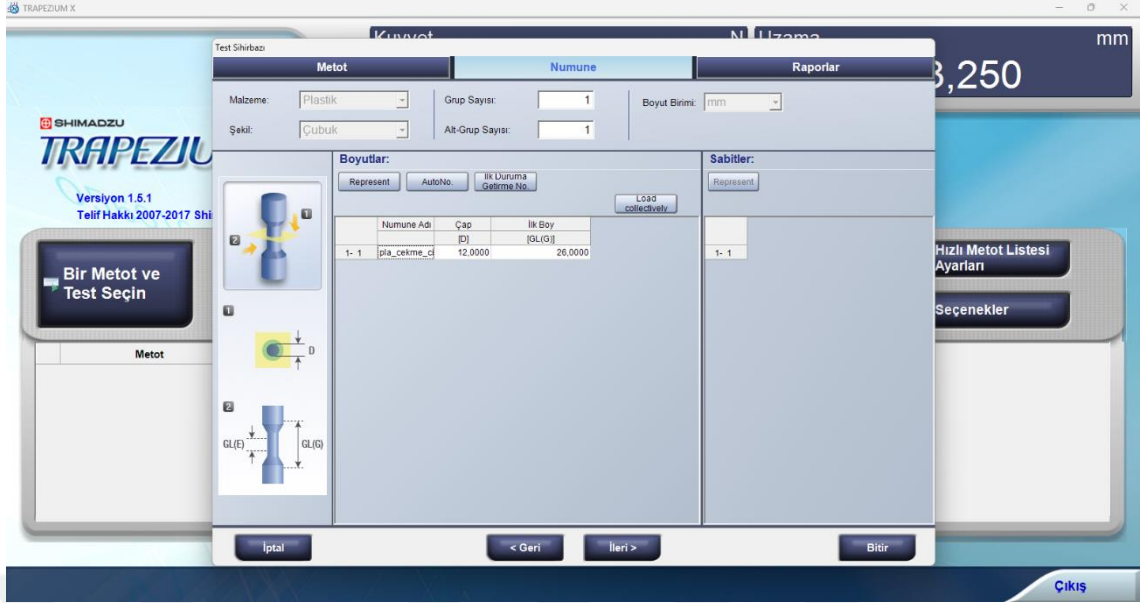
$$\varepsilon = \frac{L-L_o}{L_o} = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (3.2)$$

ΔL = Boy değişimi
L = Son boy
Lo= İlk boy

Malzeme elastik ve plastik olarak iki farklı şekil değişimine maruz kalabilir. Kuvvet etkisi altında bozulan malzeme kuvvet ortadan kalktığında eski haline geliyorsa elastik şekil değiştirme, gelemiyor ise plastik şekil değiştirmeye maruz kalmıştır. Elastik şekil değiştirme gerçekleşiyse Hooke yasası, gerilme kuvvetinin birim şekil değiştirmeye oranının young modülünü (E) verdiğini, malzemenin E değeri büyüdükçe sertliğinin arttığını ifade eder. Elastikiyet modülü Denklem 3.3 gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (3.3)$$

Gerçekleştirilen çekme dayanımında üç malzemenin de iki aparat arasındaki ilk boyu 26 mm olarak ayarlanıp makine bu vaziyetteyken sıfırlanmıştır. Şekil 3.9'da Traeziumx programından görsel verilmiştir.



Şekil 3.9: Trapeziumx programında çekme dayanımı testi başlangıcı.

3.2.2. Kayma dayanımı

Bir malzemenin bulunduğu konumdan zıt bir konuma hareket ettirilmesi için kullanılan kuvvet sonucunda oluşan gerilmeye kesme kuvveti denir. Kendi içerisinde tekil kesme ve çiftli kesme olarak ikiye ayrılmaktadır. İsimlerinden anlaşılacağı üzere; tekil kuvvet ile maruz bırakılan tekil kesme, iki kuvvet uygulananlara ise çiftli kesme kuvveti olarak ifade edilir. Denklem 3.4’de kesme kuvveti denklemi verilmiştir.

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

τ = Kesme gerilmesi

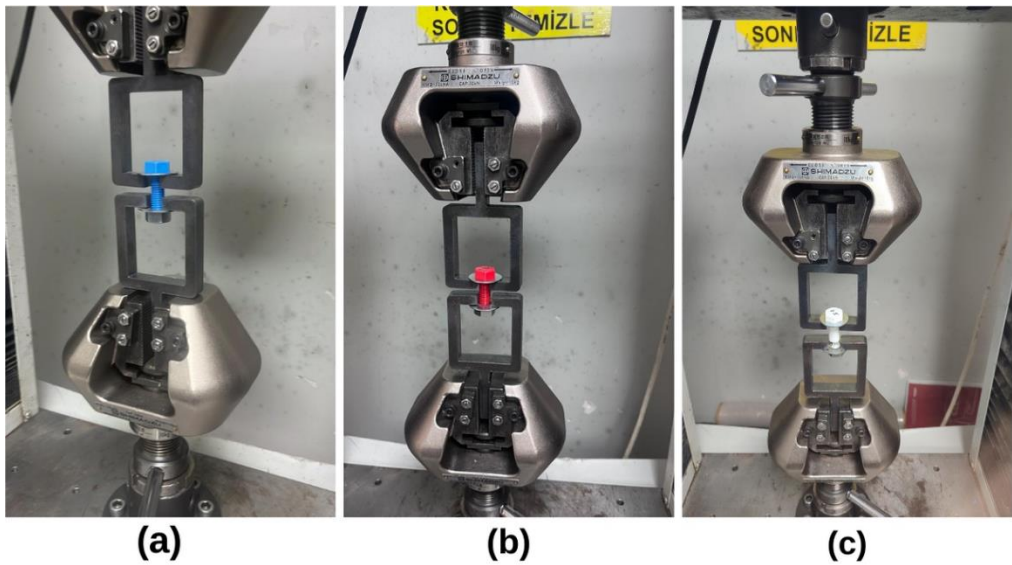
Kesme testi, ürün üzerine bir düzlem doğrultusunda paralel şekilde uygulanan kuvvete karşı oluşturulan tepki kuvvetini belirlenmesini sağlayan mekanik testtir. Kayma gerilmesine maruz kalan malzeme ürünün performansı hakkında izlenim yapılmasına imkan sağlamaktadır. Kayma gerilmesine maruz kalan malzemelerde diğer testlerden farklı olarak bozulmalar görülür, ürünün formu değişir.

BÖLÜM 4. BULGULAR

M12 somun ve cıvataya uygulanan test sonuçları (çekme, kayma, somun dış dayanımı testi) incelenmiştir. Deney sonuçları, üç tekrarlı testlerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir. Çekme dayanımı için tasarlanan aparatlar SolidWorks programında tasarlanmış olup, ST37 15mm malzemeden imal edilmiştir. Makinelere merkezlenerek bağlanmış ve bu şekilde testler gerçekleştirilmiştir.

4.1. Cıvata Çekme Dayanımının Araştırılması

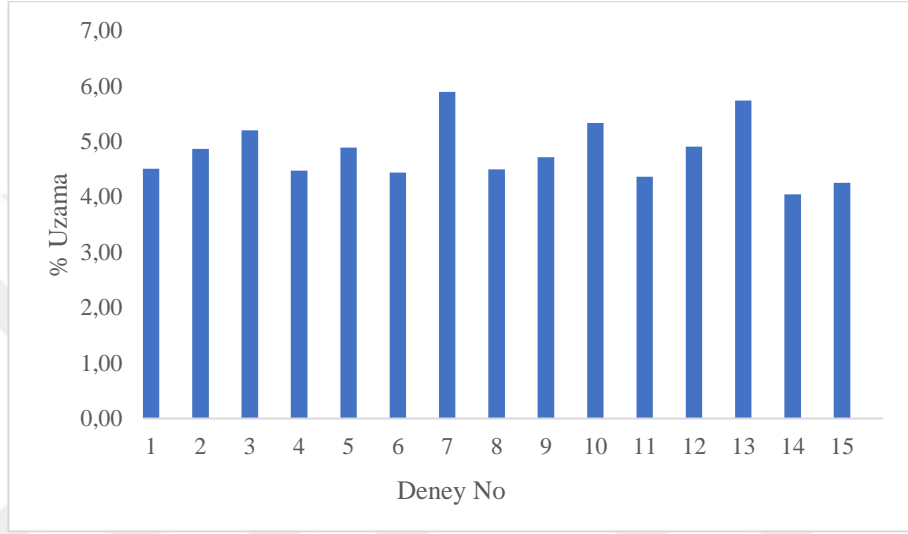
Cıvata çekme testlerinde kullanılan 3 malzeme tipi için (PLA, PETG ve ABS) sıralı bir şekilde gerçekleştirip bulguları paylaşılmıştır. Test esnasında cıvata baş kısmı ve aparat arasına bir pul, somun ile aparat arasına da bir pul konularak cıvata bağlanmıştır. İlk boy 26mm olacak şekilde testlere başlanmıştır. Her test seti için sıfırlama işlemi ve ilk boy ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bulgular Minitab programı ile incelenmiştir. Şekilde 4.1’de her 3 malzeme tipi için test anından görseller paylaşılmıştır.



Şekil 4.1: Çekme testleri. A: PLA cıvata. B: PETG cıvata. C: ABS cıvata.

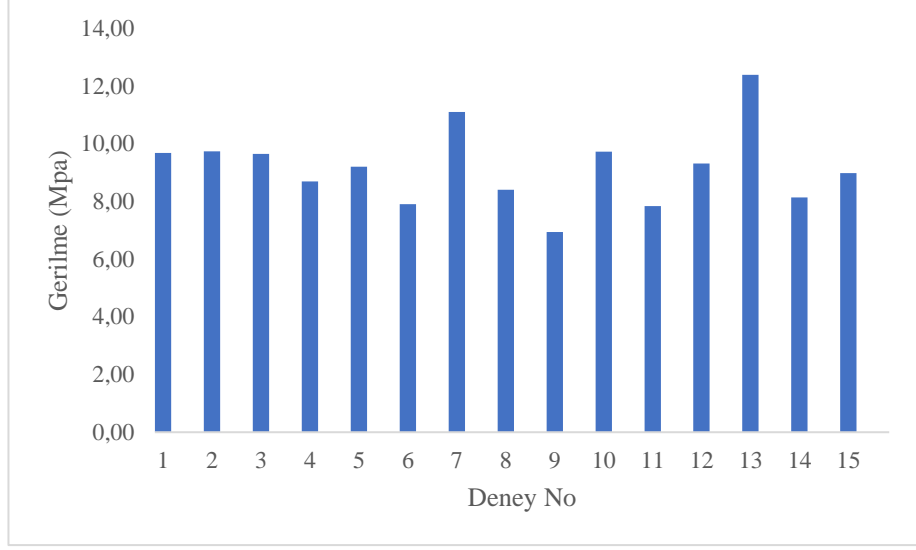
4.1.1. PLA cıvata çekme dayanımı

3 tekrarlı olarak yapılan 15 deney (toplamda 45 deney) için numuneler üretilip çekme dayanımı uygulanmıştır. Deney sırasında PLA cıvatalarda gevrek bir kopma gözlemlenmiştir. Gevrek kırılma, plastik bir şekil değiştirme işlemidir. Kopma aniden gerçekleşir ve ürün üzerinde parlak, pürüzsüz bir görüntü oluşur (Kopar ve Yıldız 2023). Şekil 4.2’de PLA çekme dayanımı % uzama miktarları paylaşılmıştır.



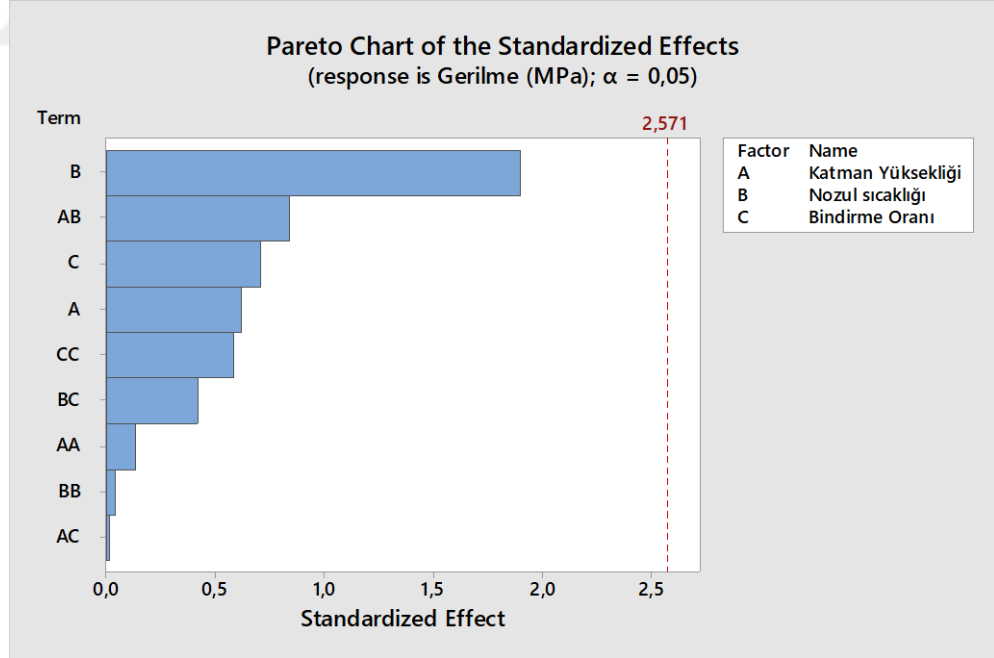
Şekil 4.2: PLA çekme dayanımı için % uzama grafiği.

Grafik incelendiğinde %5,89 ile 7. deneyde en iyi uzama performansı, %4,04 ile 14. deneyde minimum uzama miktarı gözlemlenmiştir. İki testin ortak parametresi bindirme oranıdır. Başka bir ortak parametreleri bulunmamaktadır. Şekil 4.3’de gerilme grafiğinde deney numarasına göre gerilme miktarları paylaşılmıştır.



Şekil 4.3: PLA malzemesi için gerilme grafiği.

Gerilme grafiği incelendiğinde maksimum ile minimum sonuç arasında 5,44 MPa fark gözlemlenmiş olup, 13. deney 12,38 MPa ile en iyi değeri verirken; 9. Deney 6,94 MPa ile en zayıf gerilmeyi vermiştir. İki test için ortak parametre 0,1mm olan katman kalınlığıdır. Oluşturulan pareto diyagramı Şekil 4.4’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.4: Gerilme üzerinde baskı parametrelerinin etkisi (PLA).

Gerilme sonuçları PLA çekme dayanımı için incelendiğinde tekil parametrelerden sırası ile etki parametrenin çoktan aza doğru; nozul sıcaklığı (B), bindirme oranı (C) katman

yüksekliği (A) olduğu gözlemlenmiştir. Nozul sıcaklığı ve bindirme oranı kombinasyonu PLA malzemesi için kimyasal özelliklerinden, sertliğinden dolayı gerilme özelliklerini artırmıştır. Tablo 4.1’de PLA malzemesinin çekme dayanımı varyans analiz tablosu verilmiştir.

Tablo 4.1. PLA malzemesi çekme dayanımı varyans analizi.

| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|---------------------------|----|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| Model | 9 | 13,6277 | 53,55% | 13,6277 | 1,51419 | 0,64 | 0,736 |
| Doğrusal | 3 | 10,6385 | 41,80% | 10,6385 | 3,54616 | 1,5 | 0,322 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 0,9165 | 3,60% | 0,9165 | 0,91653 | 0,39 | 0,561 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 8,532 | 33,53% | 8,532 | 8,53195 | 3,61 | 0,116 |
| Bindirme Oranı | 1 | 1,19 | 4,68% | 1,19 | 1,19001 | 0,5 | 0,51 |
| Kare | 3 | 0,8805 | 3,46% | 0,8805 | 0,29351 | 0,12 | 0,942 |
| Katman | 1 | 0,0791 | 0,31% | 0,0445 | 0,04447 | 0,02 | 0,896 |
| Yüksekliği*Katman | | | | | | | |
| Yüksekliği | | | | | | | |
| Nozul sıcaklığı*Nozul | 1 | 0 | 0,00% | 0,0046 | 0,0046 | 0 | 0,967 |
| sıcaklığı | | | | | | | |
| Bindirme Oranı*Bindirme | 1 | 0,8015 | 3,15% | 0,8015 | 0,80145 | 0,34 | 0,586 |
| Oranı | | | | | | | |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 2,1087 | 8,29% | 2,1087 | 0,7029 | 0,3 | 0,827 |
| Katman Yüksekliği*Nozul | 1 | 1,6865 | 6,63% | 1,6865 | 1,68654 | 0,71 | 0,437 |
| sıcaklığı | | | | | | | |
| Katman | 1 | 0,0005 | 0,00% | 0,0005 | 0,00053 | 0 | 0,989 |
| Yüksekliği*Bindirme Oranı | | | | | | | |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme | 1 | 0,4216 | 1,66% | 0,4216 | 0,42163 | 0,18 | 0,69 |
| Oranı | | | | | | | |
| Hata | 5 | 11,8214 | 46,45% | 11,8214 | 2,36428 | | |
| Uygunsuzluk | 3 | 11,7162 | 46,04% | 11,7162 | 3,90539 | 74,24 | 0,013 |
| Saf Hata | 2 | 0,1052 | 0,41% | 0,1052 | 0,05261 | | |
| Toplam | 14 | 25,4491 | 100,00% | | | | |

Varyans tablosu incelendiğinde deney parametrelerin etkisinin %53,55 olduğu gözlemlenmiştir. Deney içerisine dahil olmayan diğer parametrelerin PLA malzemesine etkisi %46,45 olduğu görülmüştür. Deney setleri içerisinde etki eden parametreler nozul sıcaklığı %33,53, bindirme oranı %4,68 ve katman yüksekliği %3,60 etkilediği anlaşılmıştır. Bindirme oranının daha etkili oluşu PLA malzemesinin kimyasal yapısından dolayıdır. Birleşim parametreleri incelendiğinde katman yüksekliği- bindirme oranı çarpanının etkisinin sıfır olduğu yani deneye etki etmediği, katman kalınlığı – nozul sıcaklığı kombinasyonunda en iyi birleşim parametreleri olduğu görülmüştür. PLA katman yüksekliği - nozul sıcaklığı kontür grafiği Şekil 4.5’de paylaşılmıştır. PLA malzemesi gerilme hesabı için Denklem 4.1. oluşturulmuştur.

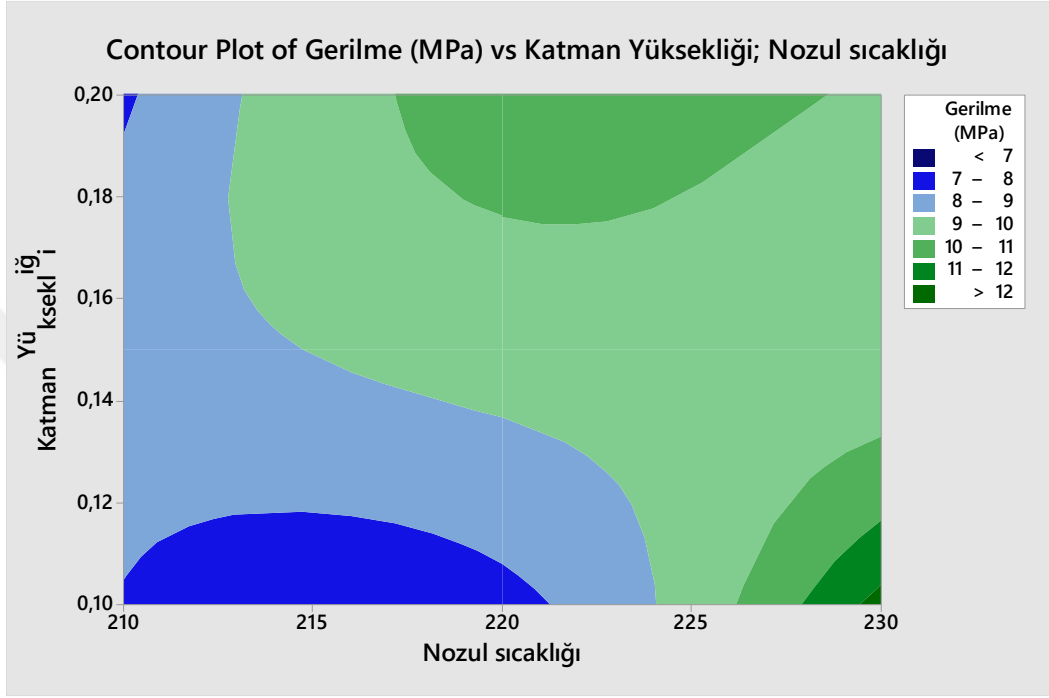
$$\sigma(\text{plac}) = -57 + 280 k + 0,36 n - 0,79 b + 44 k^2 - 0,00035 n^2 - 0,0186 b^2 - 1,30 kn \quad (4.1)$$

$$-0,05kb+0,0065nb$$

k: Katman yüksekliği (mm)

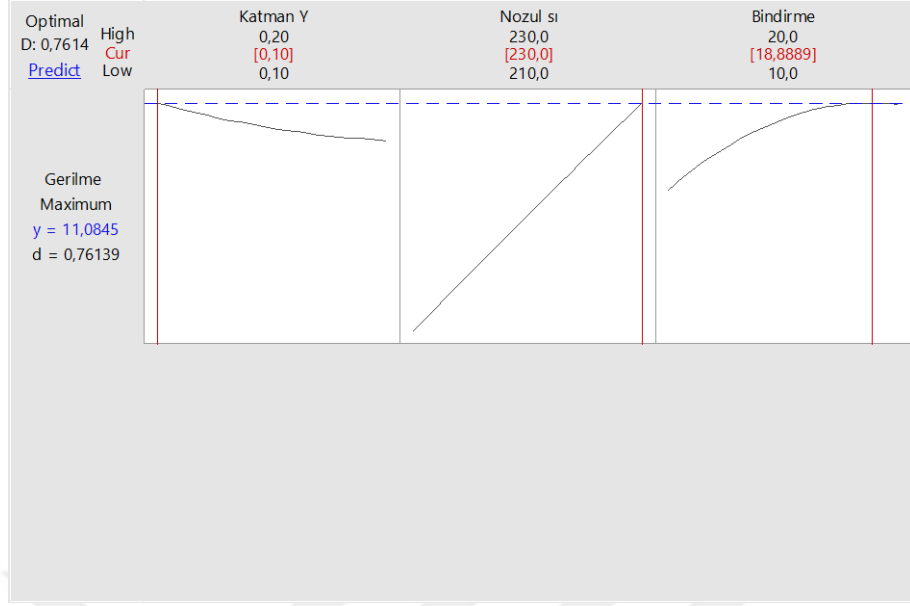
n: PLA deney sıcaklığı (nozul sıcaklığı)

b: Bindirme oranı



Şekil 4.5: PLA çekme dayanımı gerilme – katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı kontür grafiği .

PLA malzemesi çekme dayanımı için Şekil 4.5’de paylaşılmış olan kontür grafiği incelendiğinde katman kalınlığı büyüdüğüde gerilmenin küçüldüğü gözlemlenmiştir. Nozul sıcaklığına bakıldığında bu test için optimum sıcaklık değerinin 230°C olduğu görülmüştür. 210°C’den 220°C’ye kadar olan sıcaklıklarda katman kalınlığından bağımsız olarak sonuçlar zayıftır. 220°C’den itibaren 0.2mm katman kalınlığı iyi performans gösterirken 0.1mm 230°C’de en iyi performansı göstermiştir. Minitab programının hesaplamış olduğu en iyi parametreler Şekil 4.6’da paylaşılmıştır.

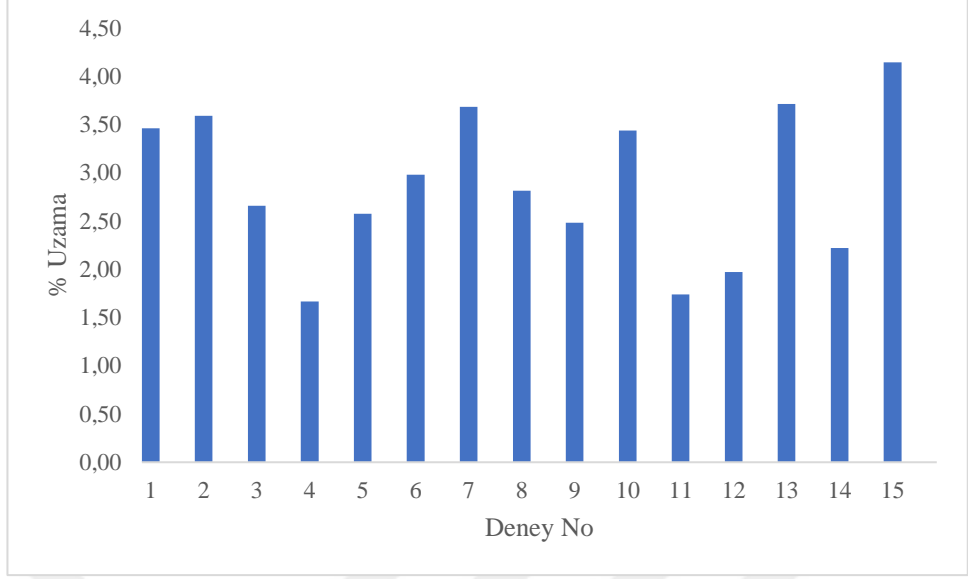


Şekil 4.6: Minitab PLA cıvata çekme dayanımı deney sonuçları değerlendirme grafiği.

Kullanılan programa göre ideal deney parametreleri ; katman yüksekliği 0,1mm, sıcaklık 230°C ve bindirme oranı %20'dir. Yapılmış olan teste ise gerilme kuvveti için aldığımız en yüksek sonucu (12,38 MPa) 13. deneyde alınmıştır. Bu testin parametreleri ise sırasıyla 0,1mm katman yüksekliği, 230°C sıcaklık ve bindirme oranı %15'dir. Tabloda high olarak verilen kısımda testin en yüksek low kısmında en düşük sonuçlarının alınacağı parametreler paylaşılmıştır. PLA cıvatası için ideal parametreler cur ile ifade edilen kısım olup yaklaşık 11,1 MPa tekabül etmektedir.

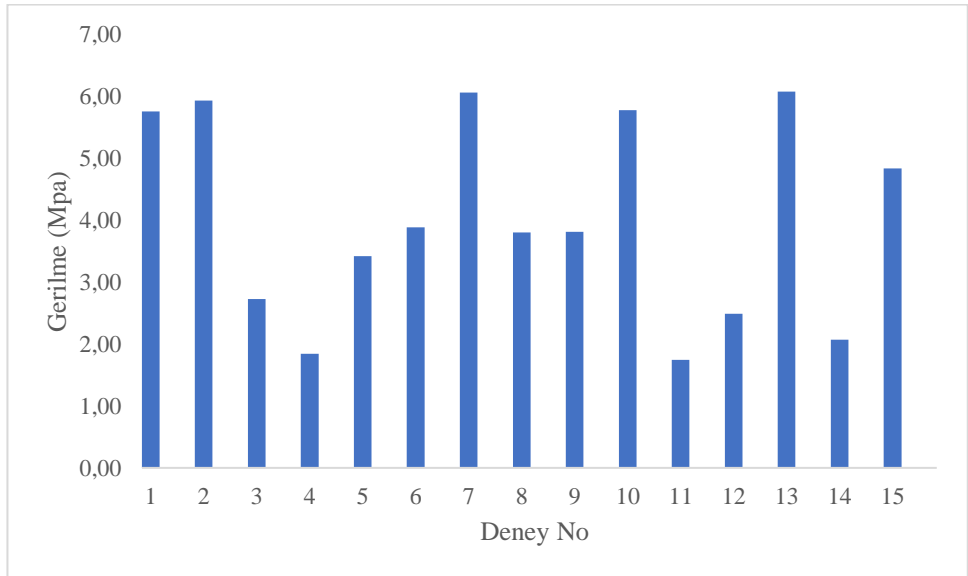
4.1.2. ABS cıvata çekme dayanımı

ABS numuneleri toplamda 45 adet olacak şekilde cıvata çekme dayanımına tabi tutulmuştur. Malzeme daha çok sünek bir kopma sergilemiştir. Sünek kırılma malzemenin bir miktar uzadıktan sonra üzerinde plastik deformasyon izlerini taşıdığı kırılma şeklidir (Kopar ve Yıldız 2023). Ürün testten sonra incelendiğinde üzerinde test izlerine rastlanabilen bir deformasyondur. Şekil 4.7'de ABS malzemesine ait % uzama grafiği paylaşılmıştır. ABS malzemenin esnekliğinden ve kimyasal yapısı sebebiyle çekme dayanımında genelde sünek kopma gözlemlenmiştir.



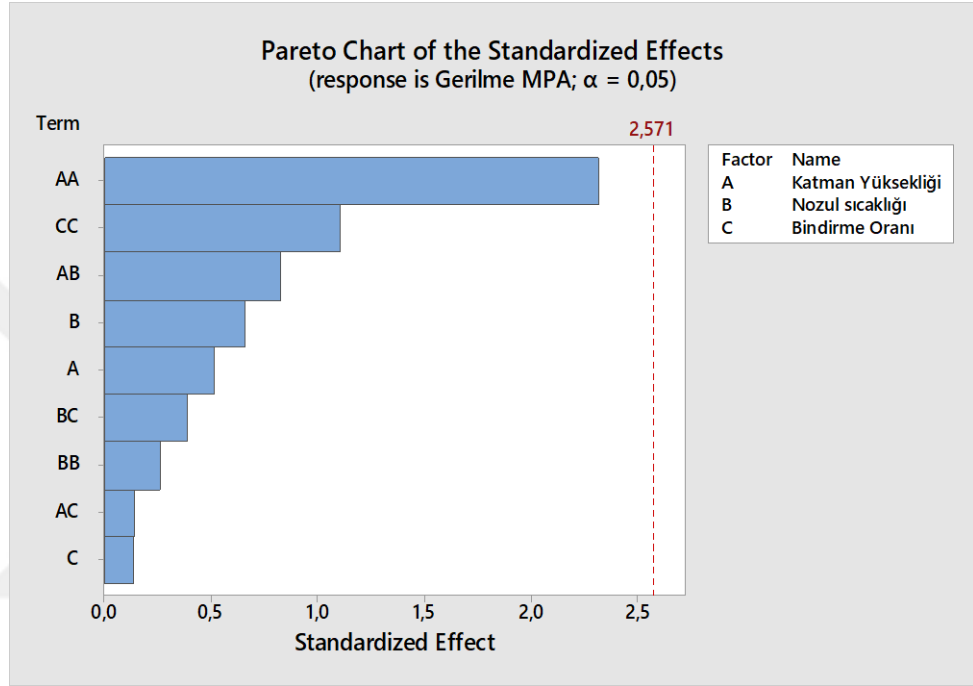
Şekil 4.7: ABS cıvata çekme dayanımı % uzama grafiği.

Uzama miktarları incelendiğinde %4,14 uzama ile 15. deneyde olduğu gözlemlenmektedir. En düşük uzama miktarı ise 4. deneyde % 1.67 olduğu görülmüştür. İki deney parametresi karşılaştırıldığında bindirme oranı ve katman yüksekliği miktarlarının aynı olduğu, nozul sıcaklıklarının farklı olduğu anlaşılmıştır. ABS malzemesi çekme dayanımı için % uzama miktarına nozul sıcaklığının büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.8’de ABS çekme gerilmesi grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 4.8: ABS cıvata çekme dayanımı gerilme grafiği.

ABS cıvata malzemesi için yapılan deneyler incelendiğinde maksimum gerilme 6,07 MPa ile 13. deney olmuştur. Gerilme miktarı en düşük olan test seti ise 1.74 MPa ile 11. deney olduğu görülmüştür. İki test için uzama miktarları incelendiğinde ortak tek bir parametreleri olduğu (bindirme oranı) gözlemlenmiştir. ABS malzemesi için bindirme oranının gerilme miktarında fazla etkisi olmadığı anlaşılmıştır. Şekil 4.9'da baskı parametrelerinin çekme dayanımına etkisini ifade eden grafik paylaşılmıştır.



Şekil 4.9: Gerilme üzerinde baskı parametrelerinin etkisi.

Gerilme sonuçları ABS çekme dayanımı için incelendiğinde tekil parametrelerden sırası ile etki parametrenin çoktan aza doğru; nozul sıcaklığı (B), katman yüksekliği (A) ve bindirme oranı (C) olduğu gözlemlenmiştir. Nozul sıcaklığı arttıkça katmanlar arası yapışmanın arttığı ve katman yüksekliği azaldıkça yapışmanın güçlendiği sonuçlarına ulaşılmıştır. Tablo 2'de varyans analiz tablosu paylaşılmıştır.

Tablo 4.2 ABS çekme dayanımı varyans analizi.

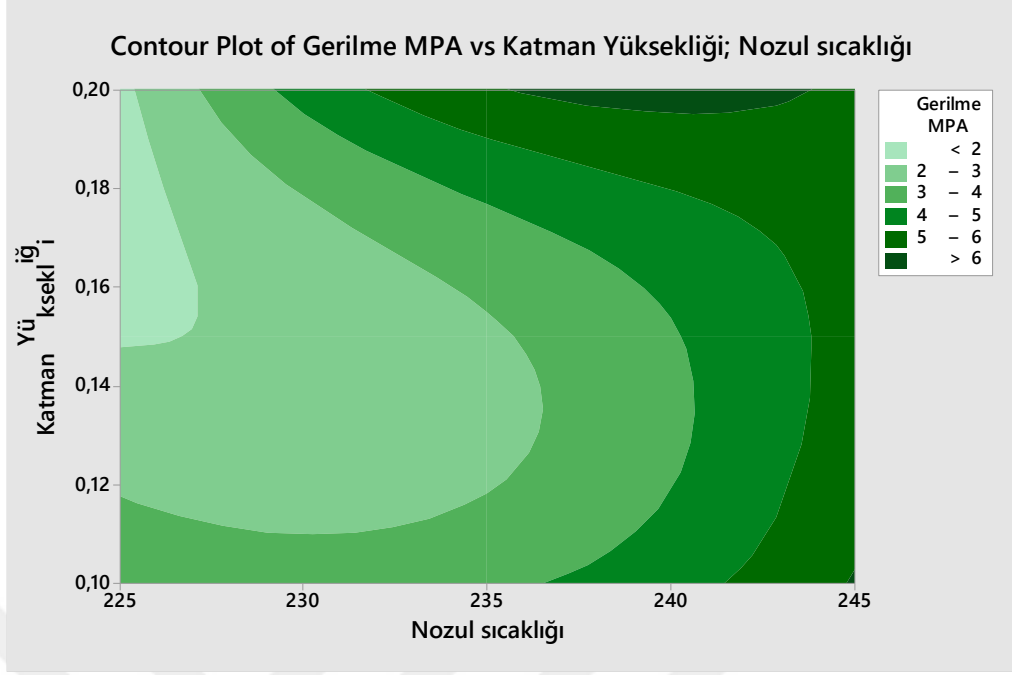
| Kaynak | DF | Seq SS | Contribution | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------|----|---------|--------------|---------|---------|------|-------|
| Model | 9 | 205,138 | 66,33% | 205,138 | 22,7931 | 1,09 | 0,487 |
| Doğrusal | 3 | 133,541 | 43,18% | 53,53 | 17,8432 | 0,86 | 0,521 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 12,243 | 3,96% | 29,4 | 29,3996 | 1,41 | 0,288 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 52,59 | 17,00% | 1,142 | 1,1422 | 0,05 | 0,824 |
| Bindirme Oranı | 1 | 68,708 | 22,22% | 22,988 | 22,9877 | 1,1 | 0,342 |

Tablo 4.2 (devamı): ABS çekme dayanımı varyans analizi.

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| Kare | 3 | 7,652 | 2,47% | 7,652 | 2,5507 | 0,12 | 0,943 |
| Katman Yüksekliği*Katman Yüksekliği | 1 | 0,078 | 0,03% | 0,002 | 0,0022 | 0 | 0,992 |
| Nozul sıcaklığı*Nozul sıcaklığı | 1 | 7,336 | 2,37% | 7,497 | 7,4968 | 0,36 | 0,575 |
| Bindirme Oranı*Bindirme Oranı | 1 | 0,238 | 0,08% | 0,238 | 0,2383 | 0,01 | 0,919 |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 63,945 | 20,68% | 63,945 | 21,3149 | 1,02 | 0,456 |
| Katman Yüksekliği*Nozul sıcaklığı | 1 | 18,879 | 6,10% | 18,879 | 18,8789 | 0,91 | 0,385 |
| Katman Yüksekliği*Bindirme Oranı | 1 | 43,125 | 13,94% | 43,125 | 43,1253 | 2,07 | 0,21 |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme Oranı | 1 | 1,941 | 0,63% | 1,941 | 1,9407 | 0,09 | 0,772 |
| Hata | 5 | 104,137 | 33,67% | 104,137 | 20,8274 | | |
| Uyumsuzluk | 3 | 103,249 | 33,38% | 103,249 | 34,4163 | 77,53 | 0,013 |
| Saf Hata | 2 | 0,888 | 0,29% | 0,888 | 0,4439 | | |
| Toplam | 14 | 309,275 | 100,00% | | | | |

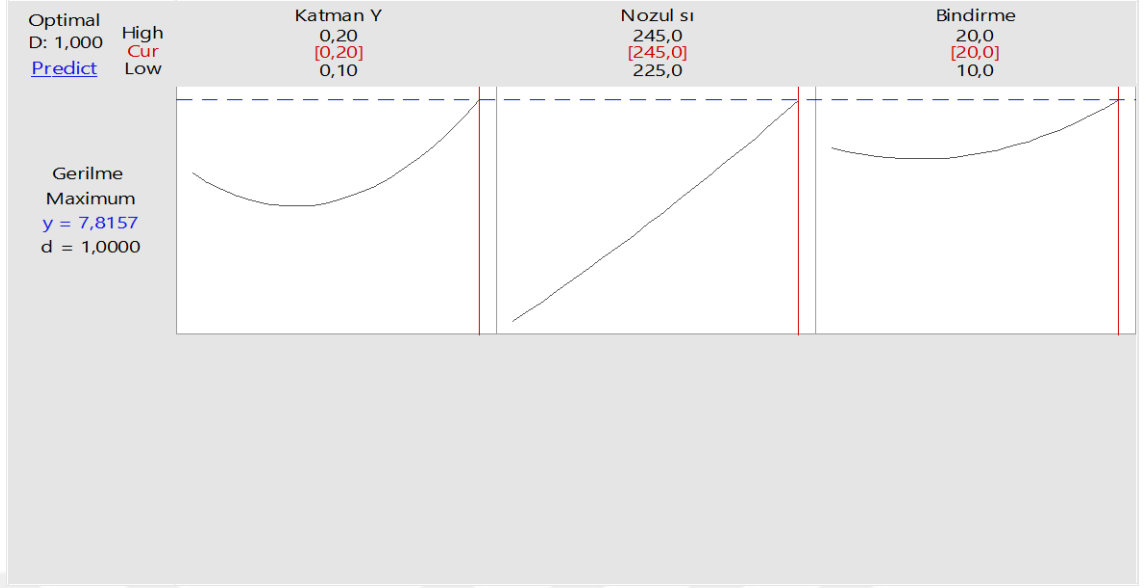
Tablo incelendiğinde deney parametrelerinin etkilerinin %83,35 olduğu görülmüş, deney parametreleri içerisinde olmayan %16,65 kısımlık etki eden faktörler olduğu kanısına varılmıştır. Deney sonuçlarında gözlemlenmiş olan en baskın parametre (nozul sıcaklığı) %59,65 oranında, katman yüksekliği %1,04 oranında ve bindirme oranının %0,88 oranında deney sonuçlarını etkilemiştir. Parametre karelerine baktığımızda toplamda %20,83 etkilediği, en yüksek oranın da %1663 ile katman kalınlığı olduğu görülmektedir. İkili fatörler incelendiğinde oran %2,87 olduğu ve en fazla katman yüksekliği ve nozul sıcaklığı olduğu (%2,30) anlaşılmıştır. Oran kontür grafiğinde (Şekil 4.10) paylaşılmıştır. Bu deney için belirgin parametrenin nozul sıcaklığı olduğu gözlemlenmiştir. ABS cıvata çekme deneyi gerilme miktarı için Denklem 4.2 oluşturulmuştur.

$$\sigma(abc) = 114 - 378k - 0,76n_a - 1,79b + 536k^2 + 0,00153536n_a^2 + 0,0256b^2 + 0,92kn_a + 0,32kb + 0,0043n_ab \quad (4.2)$$



Şekil 4.10: ABS civata çekme dayanımı gerilme – katman yüksekliği ve nozul sıcaklığı kontür grafiği.

ABS malzeme çekme dayanımı sonuçlarından oluşturulan gerilme- katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı kontür grafiği incelendiğinde (koyu yeşil en verimli) 245°C sıcaklık ve 0,2mm kalınlığın optimum sonuç olduğu gözlemlenmektedir. Sıcaklık değeri arttıkça sonuçlarda iyileşme gerçekleşir. Sıcaklık artışıyla birlikte katman kalınlığı da aynı oranda arttırıldığında daha performanslı sonuçlara ulaşılmıştır. Şekil 4.11’de ABS çekme dayanımı için Minitab programının hesaplamış olduğu ideal baskı parametre grafiği paylaşılmıştır.

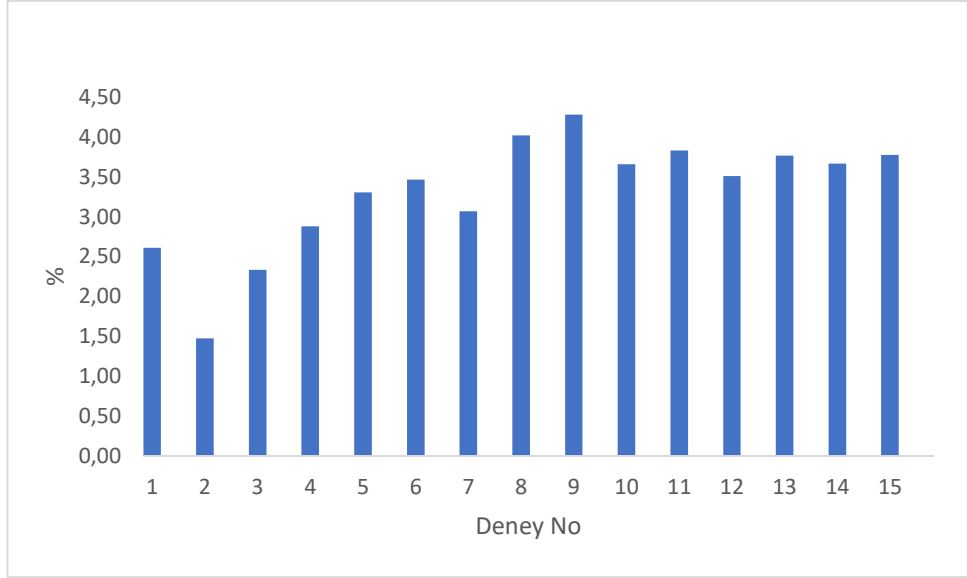


Şekil 4.11: Minitab optimum parametre grafiği (ABS cıvata çekme dayanımı).

Grafik incelendiğinde en yüksek parametreler için katman yüksekliği 0,2 mm, sıcaklık 245°C ve bindirme oranı %20 olarak hesaplanmıştır. Tam tersine bakıldığında 0,1mm yükseklik, 225°C sıcaklık ve % 10 bindirme oranı paylaşılmıştır. Minitab programına göre bu deney setleri arasında gerçekleşen ve optimum değerde olacak olan deney parametreleri en yüksek olarak ifade edilen olup teorik incelemeye göre yaklaşık 7 MPa'dır. Gerçek deney sonuçlarında ise 13. deney sonuçlarında ise 6,07 MPa olarak bulunmuştur.

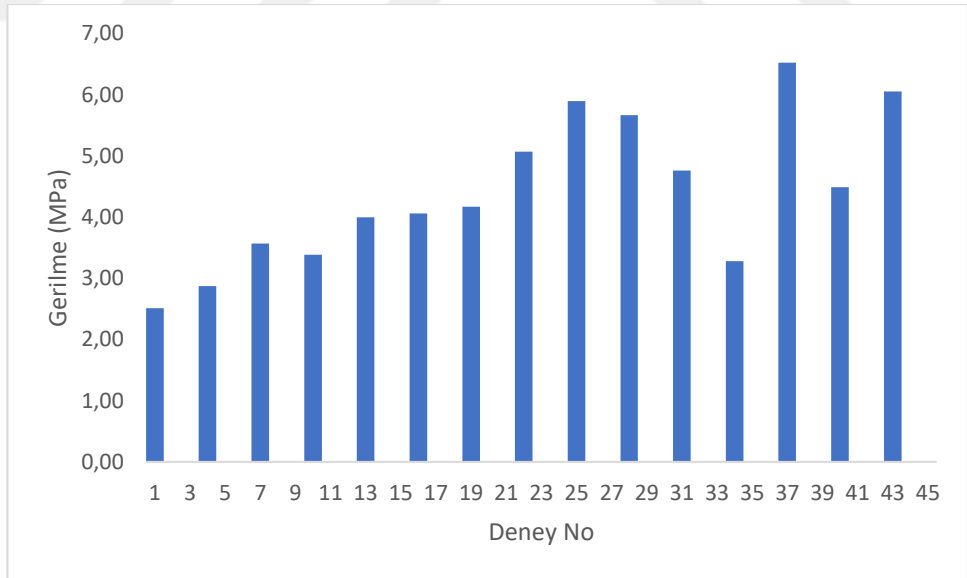
4.1.3. PETG cıvata çekme dayanımı

PETG cıvata malzemesinden 15 parametre 3 tekrarlı şekilde üretilmiş olup, toplamda 45 test yapılmıştır. Test sonuçları incelendiğinde ABS cıvatası ile benzer özellikler gösterdiği görülmüştür. Kırılma şekli yarı sünek özellikler göstermiştir. Yarı sünek kırılma, sünek ve gevrek kopma arasında bir davranış gösterir. Kopma gerçekleşmeden deformasyon gösterir fakat kopma işlemi aniden gerçekleşmez (Kopar ve Yıldız 2023). Şekil 4.12'de PETG cıvata uzama grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 4.12: PETG cıvata çekme dayanımı % uzama grafiği

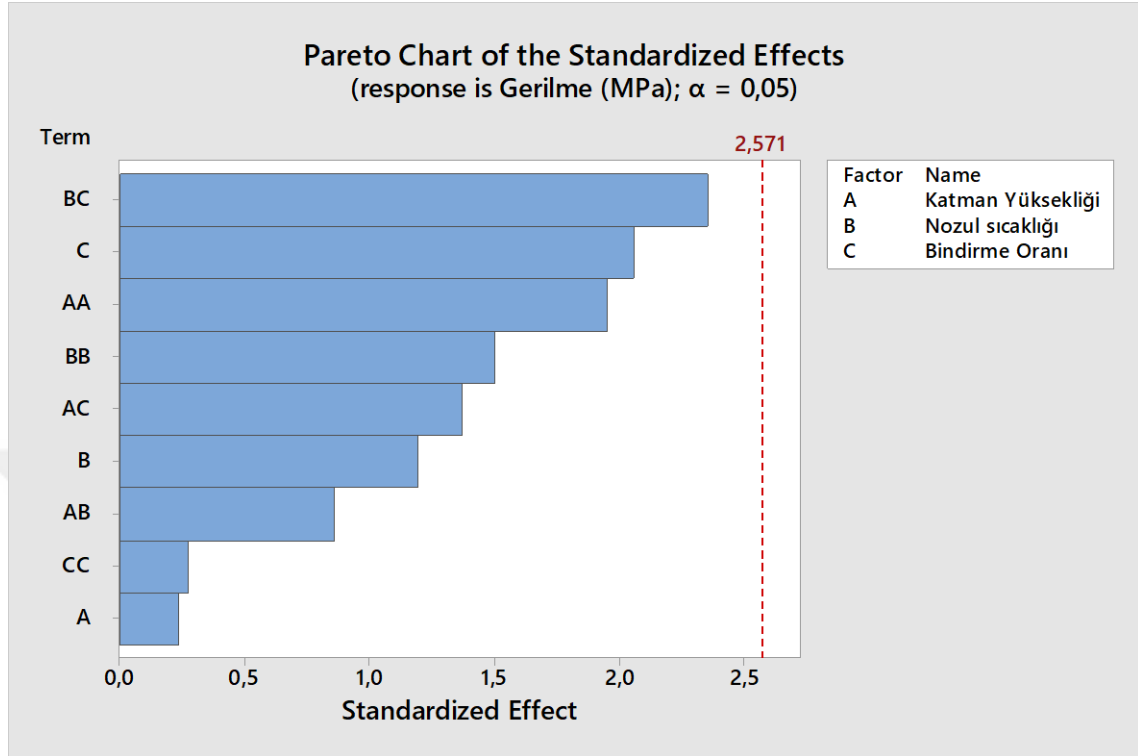
Grafik incelendiğinde uzama miktarı %4,28 ile 9. deney, en düşük uzama ise %1,47 ile 2. deneyde karşılaşılmıştır. İki deneyde oratık bir parametre bulunmamaktadır. 2. Deneyde sıcaklık ve bindirme oranı alınan en büyük değerlerken, 9. Deneyde en küçük katman kalınlığı değerine sahiptir. Gerilme miktarları Şekil 4.12’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.13: PETG cıvata çekme dayanımı gerilme grafiği

Grafik sonuçlarına bakıldığında PETG malzemesinden üretilen cıvatalar arasında en büyük gerilmeye sahip deney 6,52 MPa ile 13. Deneydir. En küçük gerilmeye sahip olan

2,51 MPa ile 2. deneydir. İki deneyi karşılaştırıldığında ortak bir parametre olmadığı görülmüştür. Şekil 4.14’da baskı parametrelerinin etkileri paylaşılmıştır.



Şekil 4.14: PETG cıvata gerilme üzerinde baskı parametrelerinin etkisi.

Grafik incelendiğinde en fazla etki oranının birdirme oranı ve nozul sıcaklığı birleşimi olduğu gözlemlenmektedir. Aynı şekilde bu deney için parametre kareleri de oldukça fazla etkilediği anlaşılmıştır. Tekil parametrelerin etkisi diğer deneylerden farklı olarak bu deneyde geride kalmıştır. Tablo 4.3’te varyans tablosu paylaşılmıştır.

Tablo 4.3. PETG cıvata dayanımı varyans analizi.

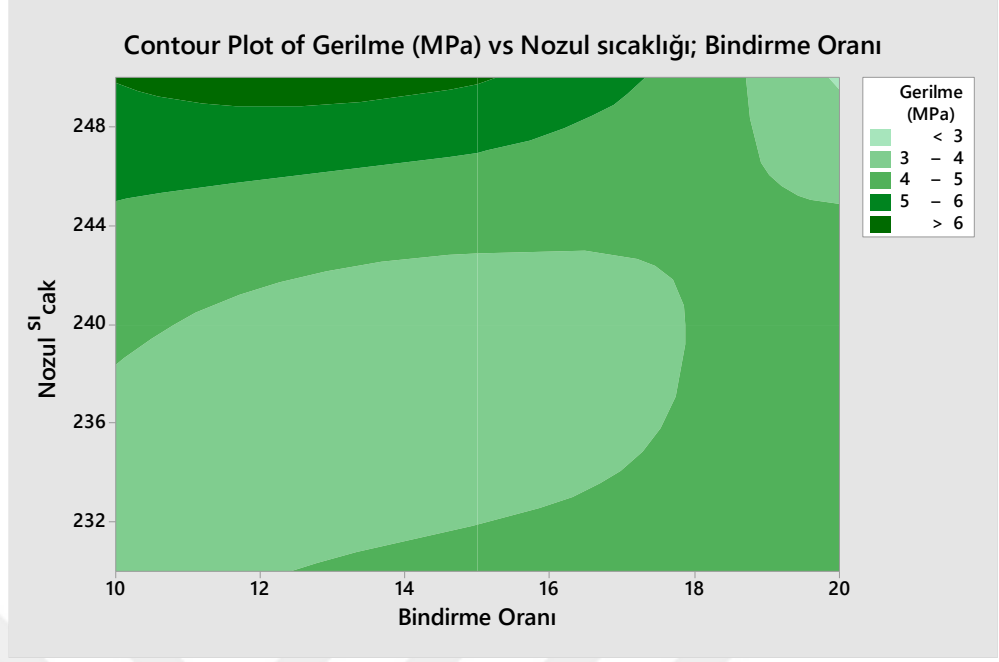
| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------------------------|----|---------|--------|---------|---------|------|-------|
| Model | 9 | 16,7381 | 80,23% | 16,7381 | 1,85979 | 2,25 | 0,192 |
| Doğrusal | 3 | 5,0926 | 24,41% | 4,73 | 1,57667 | 1,91 | 0,246 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 2,4584 | 11,78% | 0,0455 | 0,04549 | 0,06 | 0,824 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 2,438 | 11,69% | 1,1827 | 1,18268 | 1,43 | 0,285 |
| Bindirme Oranı | 1 | 0,1961 | 0,94% | 3,5018 | 3,50183 | 4,25 | 0,094 |
| Kare | 3 | 4,9046 | 23,51% | 4,9046 | 1,63486 | 1,98 | 0,235 |
| Katman Yüksekliği*Katman Yüksekliği | 1 | 2,9062 | 13,93% | 3,1518 | 3,15182 | 3,82 | 0,108 |
| Nozul sıcaklığı*Nozul sıcaklığı | 1 | 1,9364 | 9,28% | 1,8722 | 1,87219 | 2,27 | 0,192 |

Tablo 4.3 (devamı): PETG cıvata dayanımı varyans analizi.

| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-----------------------------------|----|---------|---------|--------|---------|------|-------|
| Bindirme Oranı*Bindirme Oranı | 1 | 0,0619 | 0,30% | 0,0619 | 0,06194 | 0,08 | 0,795 |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 6,741 | 32,31% | 6,741 | 2,24699 | 2,72 | 0,154 |
| Katman Yüksekliği*Nozul sıcaklığı | 1 | 0,6093 | 2,92% | 0,6093 | 0,6093 | 0,74 | 0,429 |
| Katman Yüksekliği*Bindirme Oranı | 1 | 1,546 | 7,41% | 1,546 | 1,54604 | 1,87 | 0,229 |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme Oranı | 1 | 4,5856 | 21,98% | 4,5856 | 4,58562 | 5,56 | 0,065 |
| Hata | 5 | 4,1238 | 19,77% | 4,1238 | 0,82476 | | |
| Uygunsuzluk | 3 | 3,8626 | 18,51% | 3,8626 | 1,28752 | 9,86 | 0,094 |
| Saf Hata | 2 | 0,2612 | 1,25% | 0,2612 | 0,13062 | | |
| Toplam | 14 | 20,8619 | 100,00% | | | | |

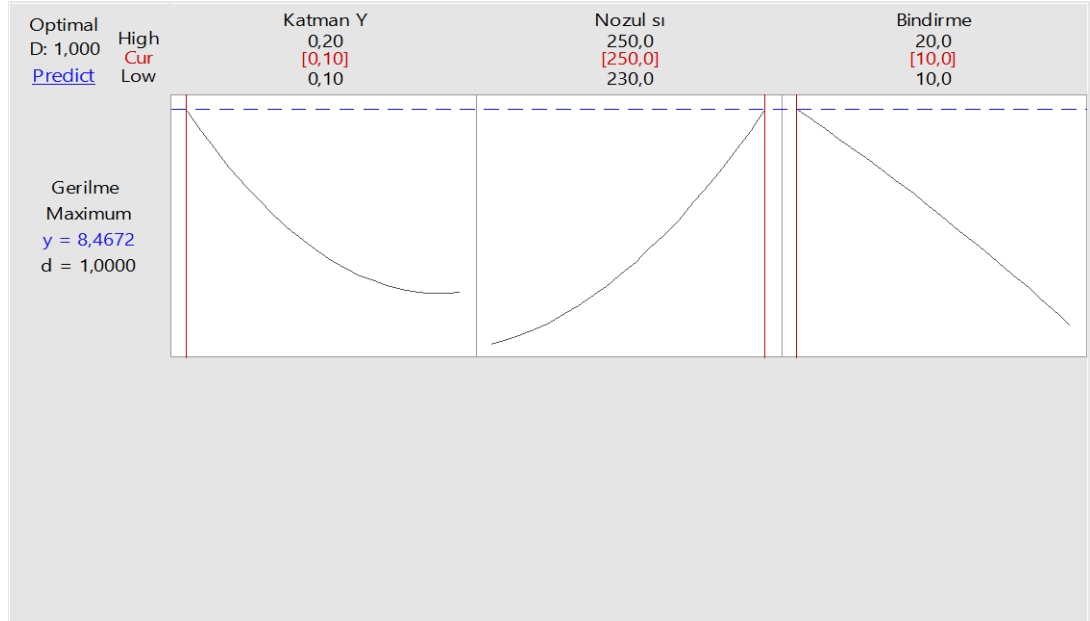
Minitab hesaplarına göre bu deney sonuçlarında tekil parametrelerden ziyade, birleşim parametreleri (%32,31) olarak etkilemiş, aralarında en fazla etkileyen kombinasyon %21,98 oranında nozul sıcaklığı-bindirme (Şekil aaaa) oranı olduğu görülmüştür. Tekil parametrelerin etkisi ise %24,41, parametre karelerinin oranı ise %23,51'dir. Bu deney seti için seçilmiş 3 parametrenin deney üzerinde ki etkisi %80,23 olmuştur. Deney sonucuna bakıldığında nozul sıcaklığı, katman yüksekliği ve bindirme oranı gerilmeyi doğrudan etkileyecek faktörler olduğu saptanmış, birleşim faktörünün önemi fark edilmiştir. PETG cıvata malzemesi için gerilmeyi hesaplayabileceğimiz formül Denklem 4.3'te belirtilmiştir.

$$\sigma(\text{PETGc}) = 310 + 28 k - 2,92 n_p + 4,89 b + 370 k^2 + 0,00712 n_p^2 - 0,0052 b^2 - 0,781 k n_p + 2,49 k b - 0,02141 n_p b \quad (4.3)$$



Şekil 4.15: PETG gerilme, nozul sıcaklığı-bindirme oranı kontür grafiği

Kontür grafiği incelendiğinde maksimum sıcaklıkta ve bindirme oranı %10-%15’de iyi sonuçlar verdiği, sıcaklık düştüğünde gerilmenin azaldığı görülmüştür. Yani sıcaklık arttığında gerilmenin arttığı, bindirme oranı arttığında gerilmenin azaldığı anlaşılmıştır. Şekil 4.16’da PETG çekme dayanımı için Minitab programının hesaplamış olduğu optimum baskı parametre grafiği paylaşılmıştır.

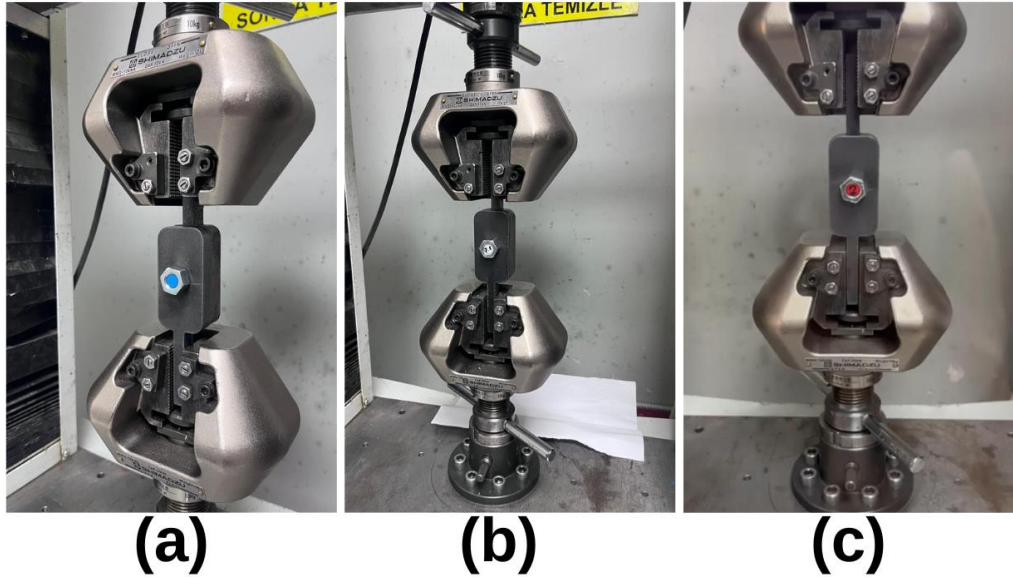


Şekil 4.16: PETG çekme dayanımı optimum değer grafiği

Grafik incelendiğinde PETG malzemesi için Minitab programının hesaplamış olduğu gerilme değeri 8,5 MPa'dır. Deney sonuçlarından elde edilen maksimum sonuç ise 6,52 MPa ile 13. deneydir. Minitab verilerine bakıldığında minimum bindirme oranı ve katman yüksekliği, maksimum sıcaklıkla kombin edildiğinde optimum gerilme kuvveti elde edilmektedir.

4.2. Cıvata Kayma Dayanımının Araştırılması

Deney parametreleri için oluşturulmuş 15 farklı set için toplamda 45 numuneye (tek bir malzeme için) kayma dayanımı uygulanmıştır. Kayma dayanımı sırasında diğer testlerden farklı olarak pul tercih edilmemiştir. M12 somun üretilmiş olan cıvataların ucuna sabitlemek için somun bağlantısı gerçekleştirilmiştir. İlk boyu cıvata çapı olarak alınıp (12mm), cıvatada kopma işleme gerçekleşene kadar test devam etmiştir. Şekil 4.17'de üç malzeme için çekme anından görsel paylaşılmıştır.

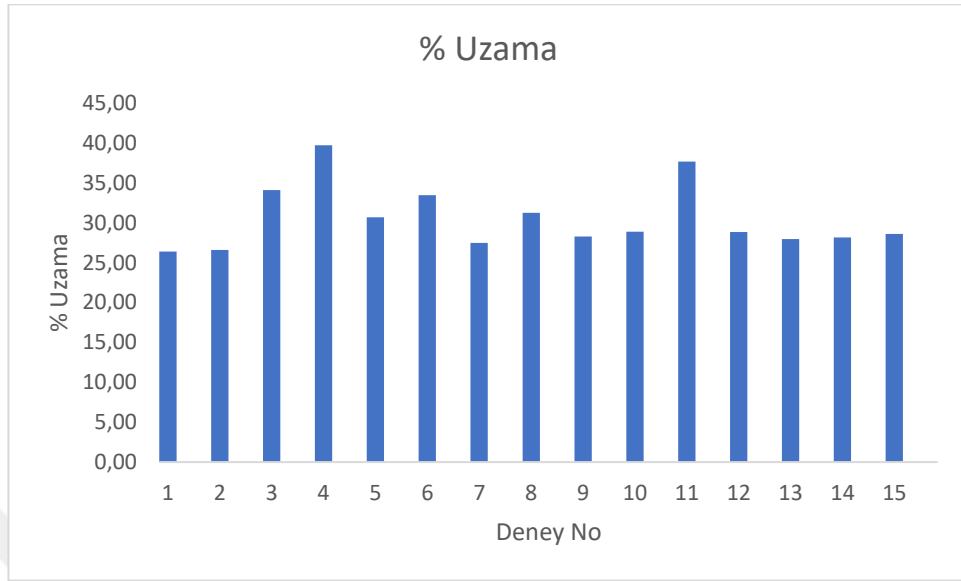


Şekil 4.17: Kayma gerilmesi testi. A: PLA. B: ABS. C: PETG

4.2.1. PLA cıvata kayma dayanımı

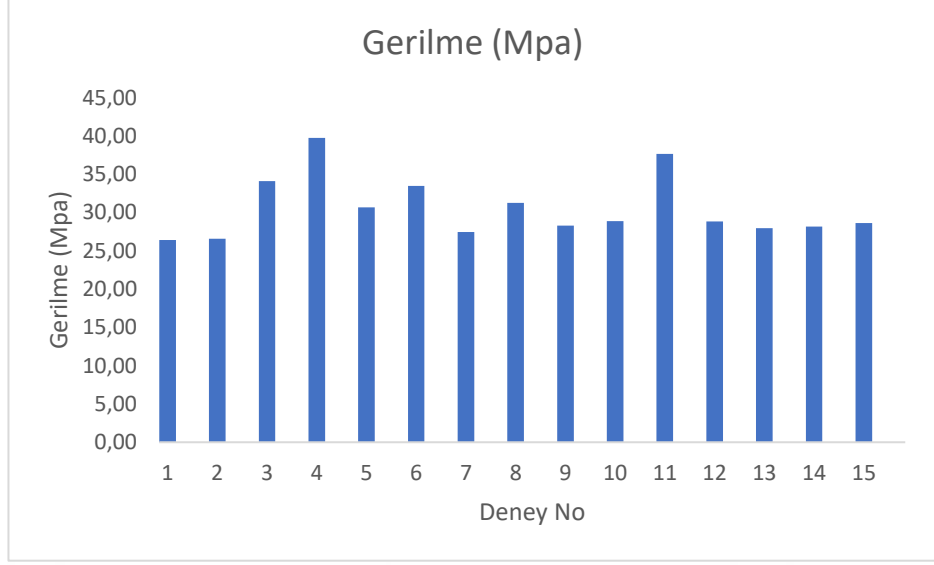
Üretilmiş olan PLA cıvata numuneleri, ST37 malzemedен tasarlanmış olan aparatlar bağlanıp ucuna sabitlenmesi için M12 somun ile sıkma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sabitlenen aparatlar çekme kuvvetine maruz bırakılıp, cıvata üzerinde oluşan kesme verileri incelenmiştir. Diğer testlerden farklı olarak kesme testlerinde iki noktadan kırılma

gözlemlenmiştir. PLA cıvatalar için oluşturulan % uzama grafiği Şekil 4.18’de paylaşılmıştır.



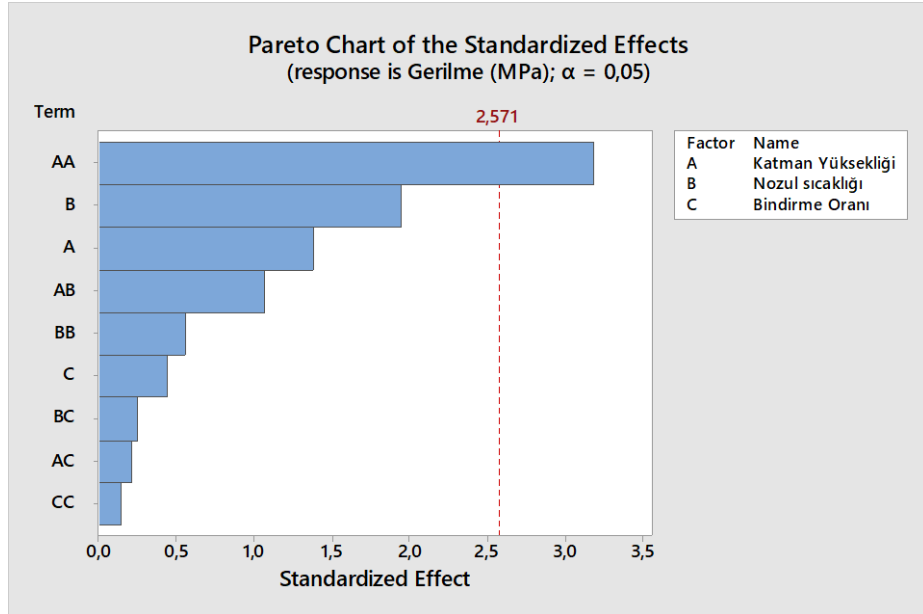
Şekil 4.18: PLA kayma gerilmesi testi % uzama sonuçları.

Test sonucu incelendiğinde uzama miktarı en fazla %39,75 ile 4. teste ait olduğu, en az uzama miktarı ise %26,41 ile 1. teste olduğu görülmüştür. İki sonucun deney parametreleri incelendiğinde bindirme oranının ortak parametre olduğu (%10), uzama miktarı en fazla olan test için sıcaklığın en düşük parametrede olduğu ve katman yüksekliğinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Gerilme grafiği Şekil 4.19’da paylaşılmıştır.



Şekil 4.19: PLA kayma gerilmesi testi gerilme grafiği.

Test sonuçlarından oluşturulmuş olan grafik incelendiğinde PLA cıvata malzemesi için maksimum gerilme 16,07 MPa ile en en yüksek değer 13. Teste elde edilirken, minimum sonuç 10,73 MPa ile 12. Teste görülmüştür. İki deney için parametreleri karşılaştırıldığında bindirme oranlarının aynı olduğu (%15), gerilmenin en büyük olduğu teste sıcaklığın maksimum değerinde, katman yüksekliğinin ise minimum seviyede olduğu görülmüştür. Şekil 4.20’de PLA çekme dayanımı için cevap gerilme grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 4.20: PLA parametre etki grafiği (kayma gerilmesi).

Gerilmeleri etkileyen parametrelere bakıldığında grafikte en fazla etkenin katman yüksekliğinin karesi olduğu görülmektedir. Tekil faktörler incelendiğinde nozul sıcaklığının etkisi fazlayken katman yüksekliğinin de etkisinin önemli olduğu fark edilmektedir. Birleşimlere bakıldığında en yüksek etki beklenildiği üzere katman kalınlığı ve nozul sıcaklığı olmuştur. Grafikte etkisinin birleşimleri de düşürdüğü gözlemlenen parametre bindirme oranı olmuştur. Faktörlerin etkilerinin sayısal oranları varyans analiz tablosunda (Tablo 4.4) paylaşılmıştır.

Tablo 4.4. PLA kayma gerilmesi varyans analiz tablosu.

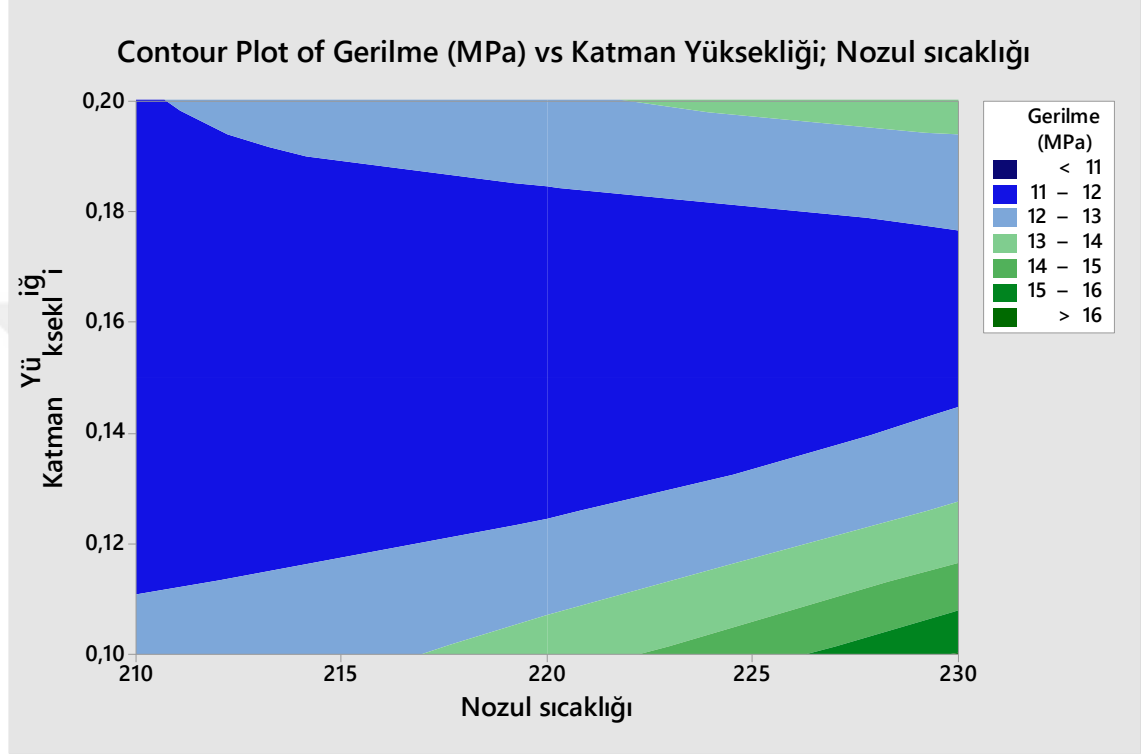
| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| Model | 9 | 19,7104 | 77,73% | 19,7104 | 2,19 | 1,94 | 0,241 |
| Doğrusal | 3 | 6,6691 | 26,30% | 6,6691 | 2,223 | 1,97 | 0,237 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 2,1568 | 8,51% | 2,1568 | 2,1568 | 1,91 | 0,226 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 4,2893 | 16,92% | 4,2893 | 4,2893 | 3,8 | 0,109 |
| Bindirme Oranı | 1 | 0,223 | 0,88% | 0,223 | 0,223 | 0,2 | 0,675 |
| Kare | 3 | 11,6252 | 45,85% | 11,6252 | 3,8751 | 3,43 | 0,109 |
| Katman Yüksekliği*Katman Yüksekliği | 1 | 11,2596 | 44,40% | 11,4966 | 11,4966 | 10,18 | 0,024 |
| Nozul sıcaklığı*Nozul sıcaklığı | 1 | 0,3412 | 1,35% | 0,3533 | 0,3533 | 0,31 | 0,6 |
| Bindirme Oranı*Bindirme Oranı | 1 | 0,0244 | 0,10% | 0,0244 | 0,0244 | 0,02 | 0,889 |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 1,4161 | 5,58% | 1,4161 | 0,472 | 0,42 | 0,748 |
| Katman Yüksekliği*Nozul sıcaklığı | 1 | 1,2939 | 5,10% | 1,2939 | 1,2939 | 1,15 | 0,333 |
| Katman Yüksekliği*Bindirme Oranı | 1 | 0,0509 | 0,20% | 0,0509 | 0,0509 | 0,05 | 0,84 |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme Oranı | 1 | 0,0713 | 0,28% | 0,0713 | 0,0713 | 0,06 | 0,812 |
| Hata | 5 | 5,6468 | 22,27% | 5,6468 | 1,1294 | | |
| Uyunsuzluk | 3 | 4,739 | 18,69% | 4,739 | 1,5797 | 3,48 | 0,231 |
| Saf Hata | 2 | 0,9079 | 3,58% | 0,9079 | 0,4539 | | |
| Toplam | 14 | 25,3572 | 100,00% | | | | |

Tablo incelendiğinde grafikte paylaşılmış olan verilerin doğruluğu bir kez daha öne çıkmış olup, en fazla etkileyen faktörün parametre kareleri olduğu ve bunun da katman yüksekliğinin karesi (%44,40) görülmüştür. Parametrelerin tekil etkisi incelendiğinde oranın %26,3 olduğu, nozul sıcaklığının %16,92'lik kısımla en büyük etkiye sahip olduğu, bindirme oranının bu deney için en zayıf sonucu (%0,88) olduğu anlaşılmıştır. Bindirme oranı genel anlamda sadece kendisi düşük etki göstermekle kalmayıp diğer parametreler ile birleştiğinde de sonuçlar için yükseltici etken olmadığı, PLA kayma dayanımı için yüksek önem arz etmediği görülmüştür. İkili deney parametre birleşim etkileri (Şekil 4.21) incelendiğinde %5,58 oranla etki ettiği, bu konu başlığı altında da

en büyük etkinin %5,10 ile nozul sıcaklığı ve katman yüksekliği çarpımı olduğu görülmüştür. PLA kayma dayanımı gerilme hesabı Denklem 4.4'de paylaşılmıştır.

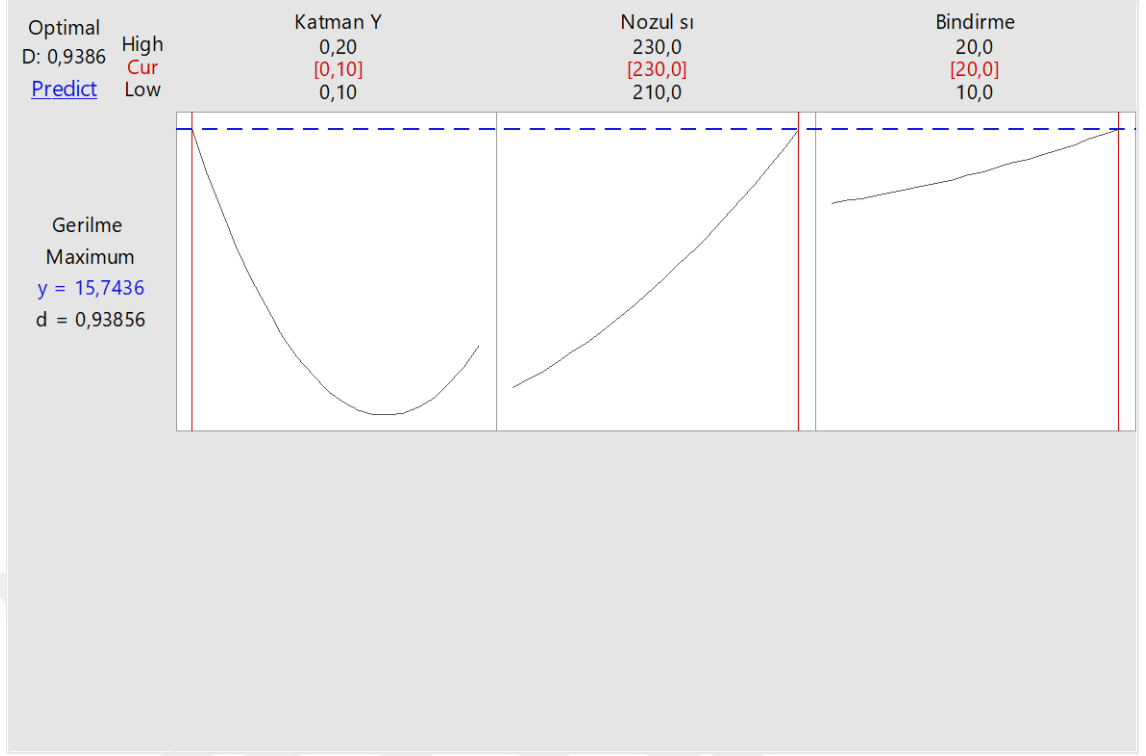
$$\tau(plak) = 133 + 35k - 1,16n - 0,58b + 706k^2 + 0,00309n^2 + 0,0033b^2 - 1,14kn \quad (4.4)$$

$$-0,45kb + 0,0027nb$$



Şekil 4.21: PLA nozul sıcaklığı- katman kalınlığı gerilme kontür grafiği.

Koyu renkli mavi kısmın baskın olduğu grafikte, gerilme faktörü için bakıldığında katman yüksekliğinin artması gerilmede düşüş sağlarken, sadece 230°C kısımda ortalama bir sonuç verdiği görülmüştür. Katman yüksekliği minimum değerindeyken (0,1mm) sıcaklığın artışıyla gerilmenin de arttığı, 230°C ve 0,1mm parametrelerinin gerilmede iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.22'de optimum deney parametre grafiği verilmiştir.

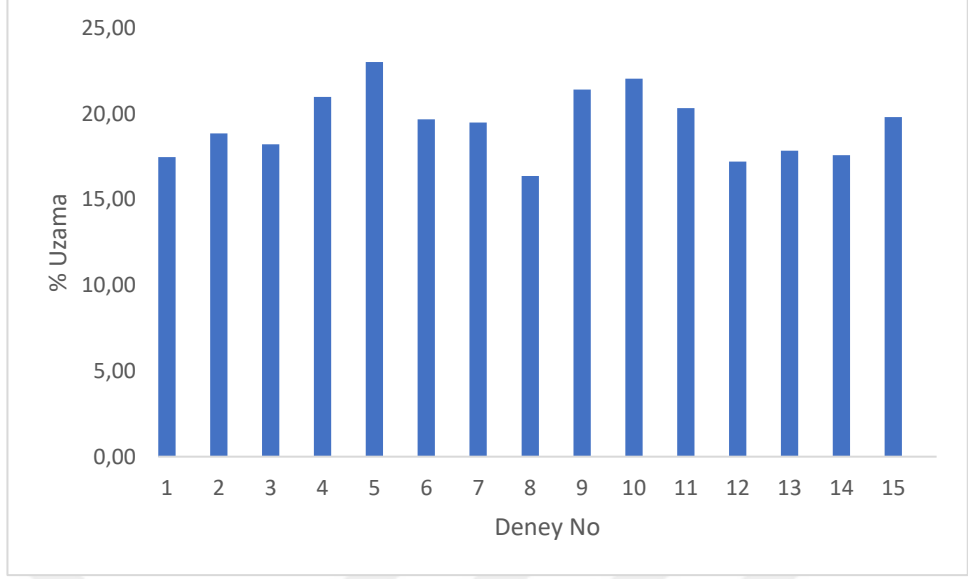


Şekil 4.22: PLA optimum parametre etki grafiği (kayma gerilmesi).

PLA cıvata testi için Minitab programında oluşturulan grafikte, gerilmenin optimum değeri 15,74 MPa olabileceği hesaplanmıştır. Bu deney sonucunun oluşabilmesi için sıcaklığın maksimum değerinde (230°C), katman yüksekliğinin minimum değerinde (0,1mm) ve bindirme oranının %20 olması gerektiği görülmüştür.

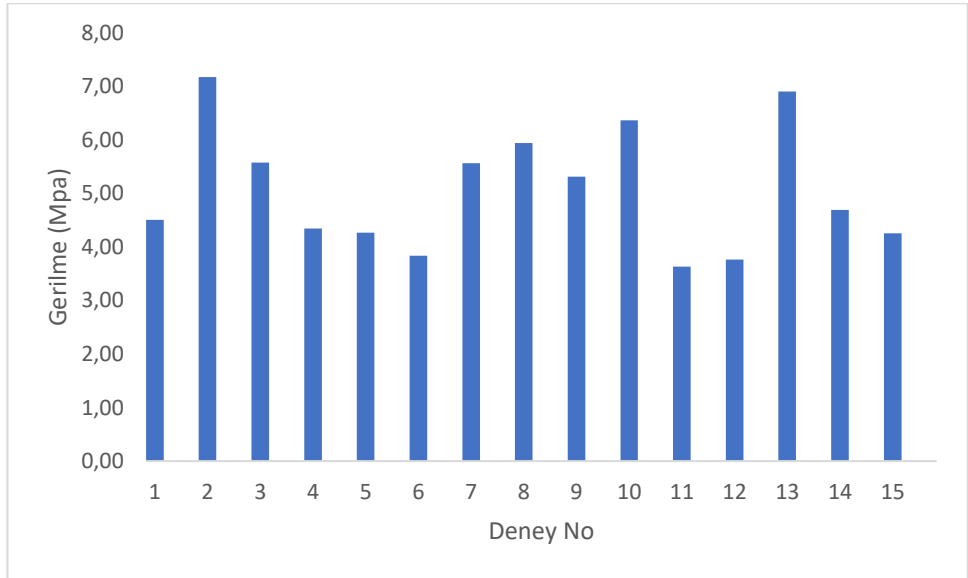
4.2.2. ABS cıvata kayma dayanımı

ABS cıvata kayma dayanımı 15 deney parametresi 45 numuneden (her numuneden özdeş 3 adet) gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testin uzama sonuçları grafiği Şekil 4.23'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.23: ABS kayma dayanımı % uzama grafiği.

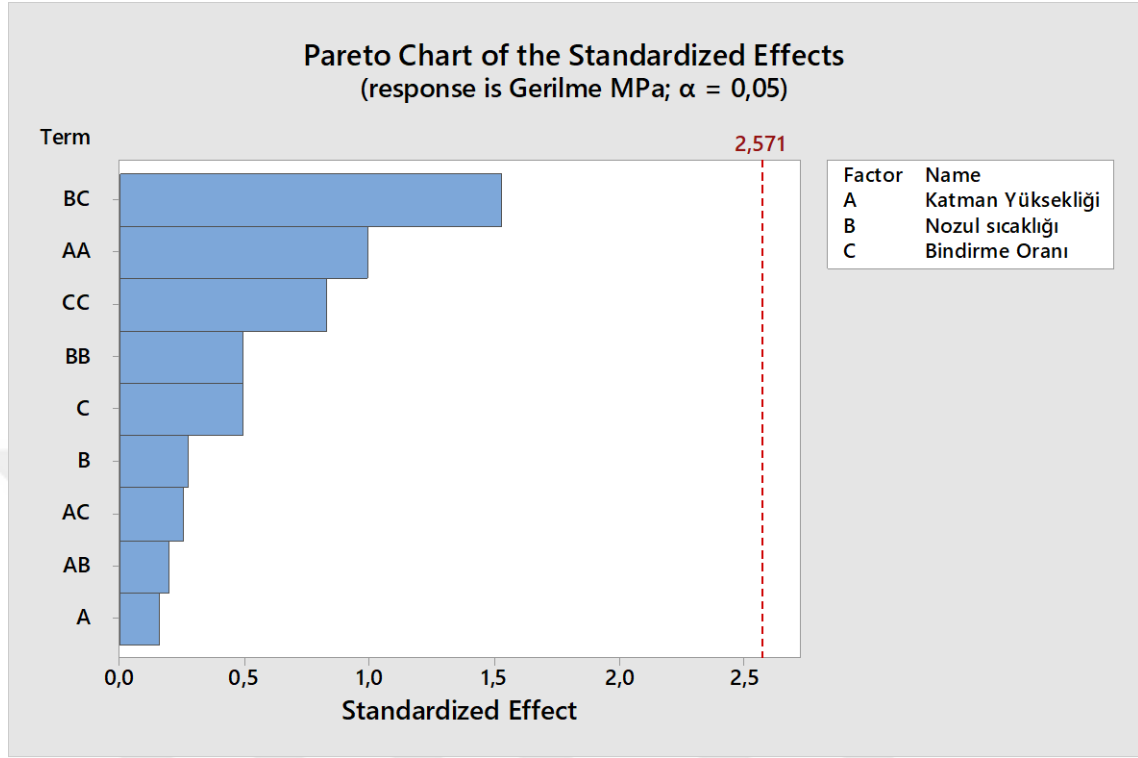
Yapılan testler sonucunda ABS cıvata malzemesinin % uzama grafiği oluşturulmuştur. Grafik incelendiğinde maksimum uzama miktarı %26,53 ile 1. teste, minimum uzama miktarı ise %19,98 ile 8. deneyde gözlemlenmiştir. İki deneyin parametreleri incelendiğinde deney sıcaklıklarının aynı olduğu (235°C) anlaşılmıştır. Gerilme grafiği Şekil 4.24’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.24: ABS kayma dayanımı gerilme grafiği.

Grafik incelendiğinde gerilmenin en fazla olduğu deney (7,17 MPa), en düşük olduğu deney ise 11. deney (3,63 MPa) görülmüştür. İki deneyin parametreleri

karşılaştırıldığında ortak hiç bir parametresi olmadığı gözlemlenmiştir. Parametrelerin deney üzerindeki etkisini anlatan yatay sütun grafiği Şekil 4.21’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.25: PLA parametre etki grafiği (kayma gerilmesi).

İncelenen grafikte, nozul sıcaklığı ve bindirme oranının çarpımının deneyin en etken faktörü olduğu görülmektedir. ABS malzemesi kesme deneyi için deney parametrelerinin tekil etkilerinden çok kareleri ve birleşimleri etki etmektedir. ABS kimyasal yapısı sebebiyle esnektir. Bu sebeple bindirme oranı ABS’ye hem tekil olarak hemde birleşimlere oldukça destek olmuştur. Varyans tablosunda (Tablo 4.5) bu etkinin sayısal oranları paylaşılmıştır.

Tablo 4.5: ABS kayma gerilmesi varyans analiz tablosu.

| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------|----|---------|--------|---------|---------|------|-------|
| Model | 9 | 14,8279 | 80,76% | 14,8279 | 1,64754 | 2,33 | 0,182 |
| Doğrusal | 3 | 11,9049 | 64,84% | 0,2469 | 0,08229 | 0,12 | 0,947 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 0,461 | 2,51% | 0,0189 | 0,0189 | 0,03 | 0,877 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 8,3804 | 45,64% | 0,0533 | 0,0533 | 0,08 | 0,795 |
| Bindirme Oranı | 1 | 3,0635 | 16,68% | 0,1747 | 0,17467 | 0,25 | 0,64 |
| Kare | 3 | 1,1911 | 6,49% | 1,1911 | 0,39703 | 0,56 | 0,663 |

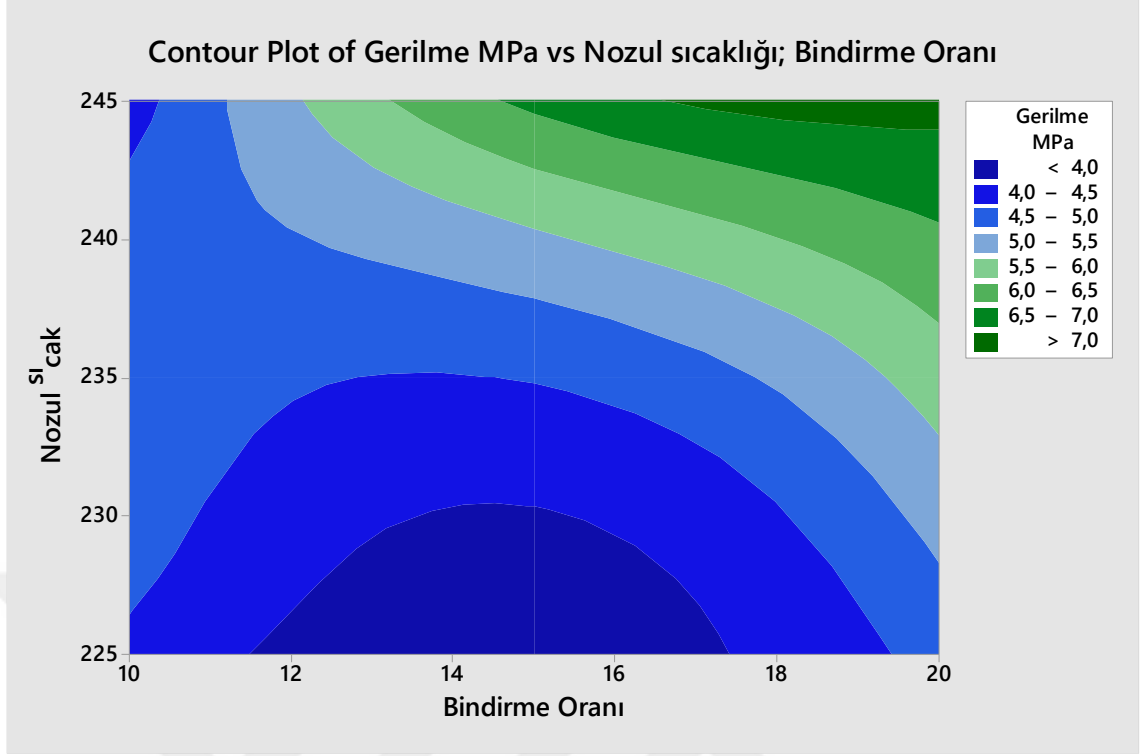
Tablo 4.5 (devamı): ABS kayma gerilmesi varyans analiz tablosu.

| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------------------------|----|---------|---------|--------|---------|------|-------|
| Katman Yüksekliği*Katman Yüksekliği | 1 | 0,5732 | 3,12% | 0,6931 | 0,69314 | 0,98 | 0,367 |
| Nozul sıcaklığı*Nozul sıcaklığı | 1 | 0,1343 | 0,73% | 0,1754 | 0,17544 | 0,25 | 0,639 |
| Bindirme Oranı*Bindirme Oranı | 1 | 0,4836 | 2,63% | 0,4836 | 0,48356 | 0,68 | 0,446 |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 1,7318 | 9,43% | 1,7318 | 0,57728 | 0,82 | 0,537 |
| Katman Yüksekliği*Nozul sıcaklığı | 1 | 0,0283 | 0,15% | 0,0283 | 0,02825 | 0,04 | 0,849 |
| Katman Yüksekliği*Bindirme Oranı | 1 | 0,0468 | 0,26% | 0,0468 | 0,04685 | 0,07 | 0,807 |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme Oranı | 1 | 1,6567 | 9,02% | 1,6567 | 1,65674 | 2,34 | 0,186 |
| Hata | 5 | 3,5335 | 19,24% | 3,5335 | 0,7067 | | |
| Uygunsuzluk | 3 | 1,7875 | 9,74% | 1,7875 | 0,59583 | 0,68 | 0,64 |
| Saf Hata | 2 | 1,746 | 9,51% | 1,746 | 0,873 | | |
| Toplam | 14 | 18,3613 | 100,00% | | | | |

ABS kayma dayanımı için belirlenen 3 parametrenin gerilme etki varyans tablosunda belirtildiği üzere %80.76'dır. Bu oranın büyük bir kısmını (%64,84) parametre etkileri, ikili faktörler %9,43 kısmı ve parametre kareleri %6,49 oranla paylaşılmıştır. İncelenen sonuçlar neticesinde ABS malzemesinin nozul sıcaklığı (%45,64) oranında etkileyip, testin belirleyici parametresi olmuştur. Bindirme oranı bireysel olarak incelendiğinde katma yüksekliğinden daha çok değere sahip olmuştur hem de nozul sıcaklığı ile birleştiğinde oldukça fazla etkilediği gözlemlenmiştir. Kontür grafiğinde gerilme üzerindeki nozul sıcaklığı ve bindirme oranının etkisi paylaşılmıştır. ABS kayma dayanımı gerilme hesaplaması için Denklem 4.5' oluşturulmuştur.

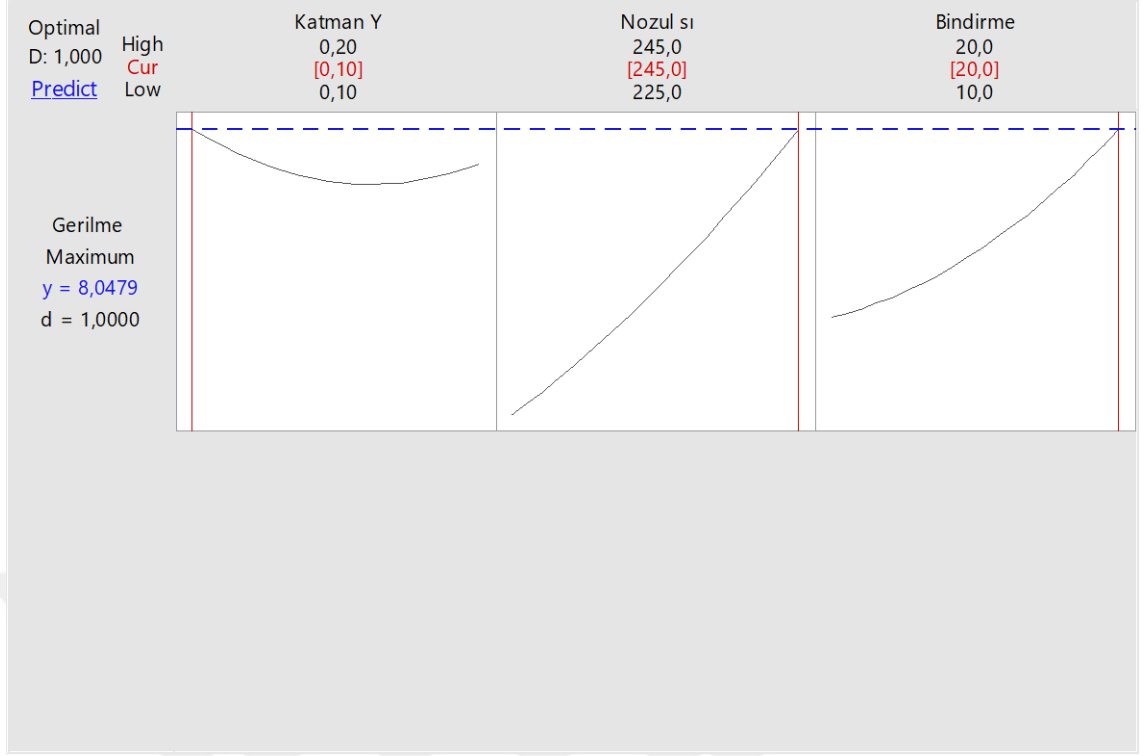
$$\tau(absk)=147- 24k- 1,09 n_a- 3,40 b+ 173 k^2+ 0,00218 n_a^2 \quad (4.5)$$

$$+ 0,0145 b^2- 0,168 kn_a+ 0,43 kb+ 0,01287 n_a b$$



Şekil 4.27: ABS kayma dayanımı nozul sıcaklığı ve bindirme oranı kontür grafiği.

Grafik incelendiğinde bindirme oranı ve sıcaklık düşükken koyu mavi renkli alanın fazla olduğu görülmektedir. Özellikle 225°C sıcaklık ile %0,15 bindirme oranı bu test için minimum değerleri verilmiştir. Sıcaklıktaki artışla birlikte bindirme oranının da artması testin gerilme verilerinde oldukça fazla artış göstermesine sebep olmuştur. Bununla birlikte ABS malzemesi için sıcaklık faktörünün ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur. Minitab programında hesaplanan optimum sonuçlar Şekil 4.28'de paylaşılmıştır.

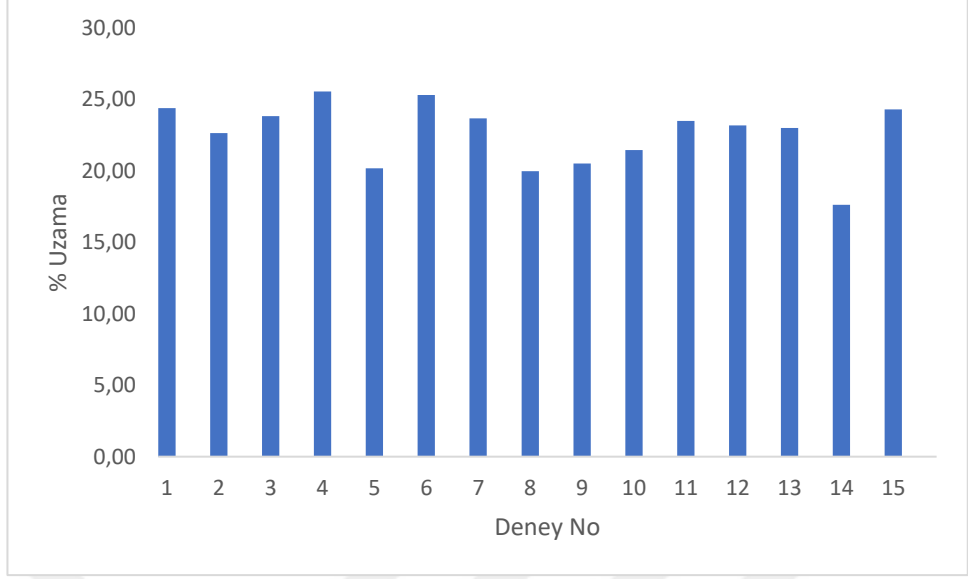


Şekil 4.28: ABS optimum parametre grafiği (kayma gerilmesi).

Grafik incelendiğinde nozul sıcaklığı arttıkça gerilmenin de arttığı, katman kalınlığı arttığında gerilme miktarının da düştüğü görülmektedir. Katman kalınlığının azalırken nozul sıcaklığının artması katmanlar arası yapışma artacağından gerilme sonuçlarını pozitif yönde etkiler. Bindirme oranı arttıkça yapışma alanı da artacağından üç faktör birleştirildiğinde gerilme için optimum sonuçları çıkartır. Minitab programının hesaplarına göre optimum gerilme miktarı (8,05 MPa) 0,1mm katman yükseliği, 245°C sıcaklık ve bindirme oranı %20 olduğunda ulaşılmaktadır.

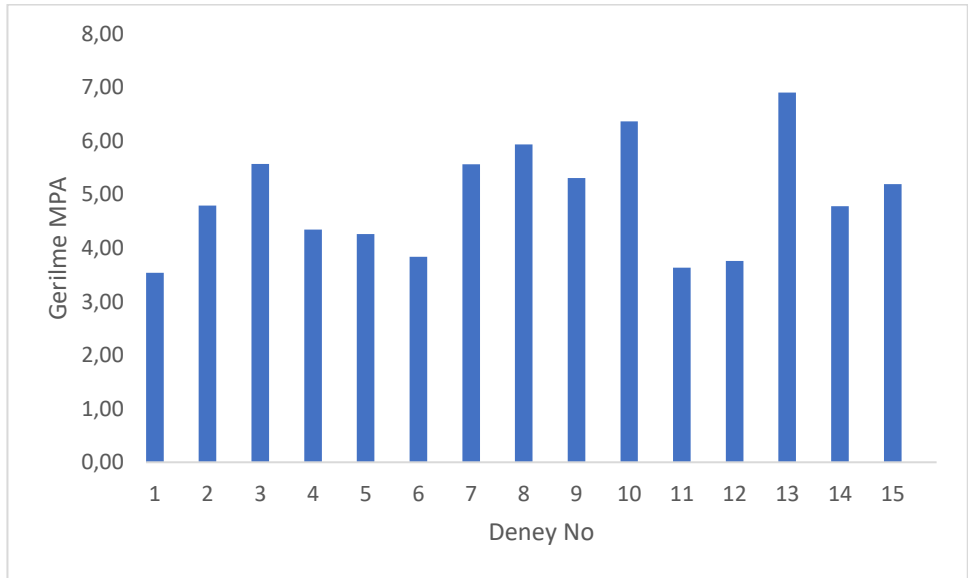
4.2.3. PETG cıvata kayma dayanımı

PETG malzemesi için kayma dayanımı 15 deney parametresinde her biri özdeş 3'er numune üretilerek toplamda 45 ürün ile gerçekleştirilmiştir. PETG cıvata kayma dayanımı % uzama miktarları grafikte (Şekil 4.29) paylaşılmıştır.



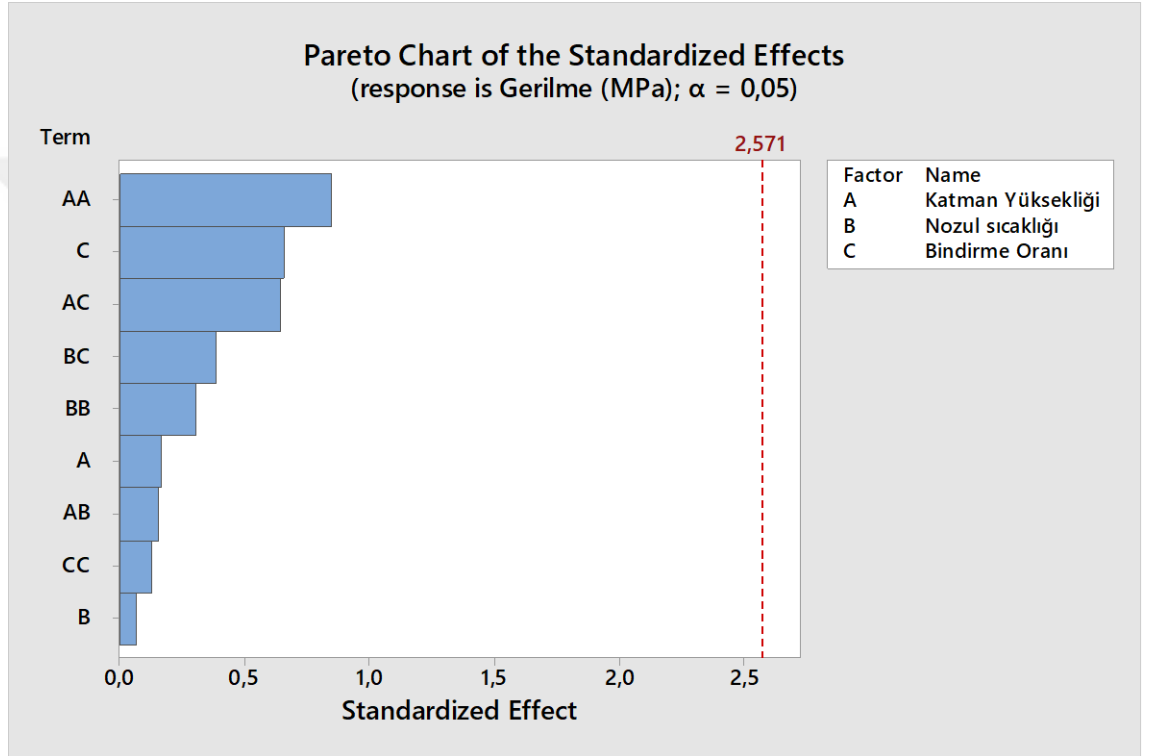
Şekil 4.29: PETG kayma dayanımı % uzama grafiği.

Grafik incelendiğinde 15 deney içerisinde 4. deneyin %25,56 uzama miktarı en fazla, 14. deneyin %17,64 ile uzama miktarı en az olan deney olduğu görülmüştür. İki deneyin parametreleri karşılaştırıldığında, sıcaklık değerinin ve bindirme oranlarının ortak olduğu gözlemlenmiştir. Bindirme oranının artışıyla (14. deney) artan alanın uzama miktarını negatif yönde etkilediğini alan azaldıkça uzama miktarının da arttığı göstermektedir. Şekil 4.30’da gerilme grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 4.30: ABS kayma dayanımı gerilme grafiği.

Gerilme grafiği incelendiğinde gerilmenin en fazla olduğu deneyin 6,9 MPa ile 13. deney, en az ise 3,54 MPa ile 1. deney olduğu gözlemlenmiştir. İki deneyin parametreleri karşılaştırıldığında ortak bir parametreleri olmadığı görölmüştür. İnce katmanlı oluşu (0,1mm), yüksek sıcaklığı sayesinde (230°C) katmanlar arası yapışma arttığından gerilme sonuçlarını etkilemiştir. Grafikte (şekil 4.31) parametrelerinin etki dağılımı incelenmiştir.



şekil 4.31: ABS parametre etki grafiği (kayma gerilmesi).

Yatay sütun grafiğinde parametrelerin etki dağılımı paylaşılmıştır. İkili parametre kombinasyonlarında katman yüksekliği ve bindirme oranının deney sonuçlarına etkisi görölmektedir. Yine aynı şekilde nozul sıcaklığı ve bindirme oranı kombinasyonu da deney için etkili birleşim olmuştur. Sıcaklığı artışıyla bindirme oranının da artması gerilmeyi malzemede tutunma alanını arttırdığında mekanik anlamda iyi sonuçlar vermesini sağlamıştır. Varyans tablosunda (Tablo 4.6) parametrelerin etkisinin sayısal olarak ifade edilmiş hali paylaşılmıştır.

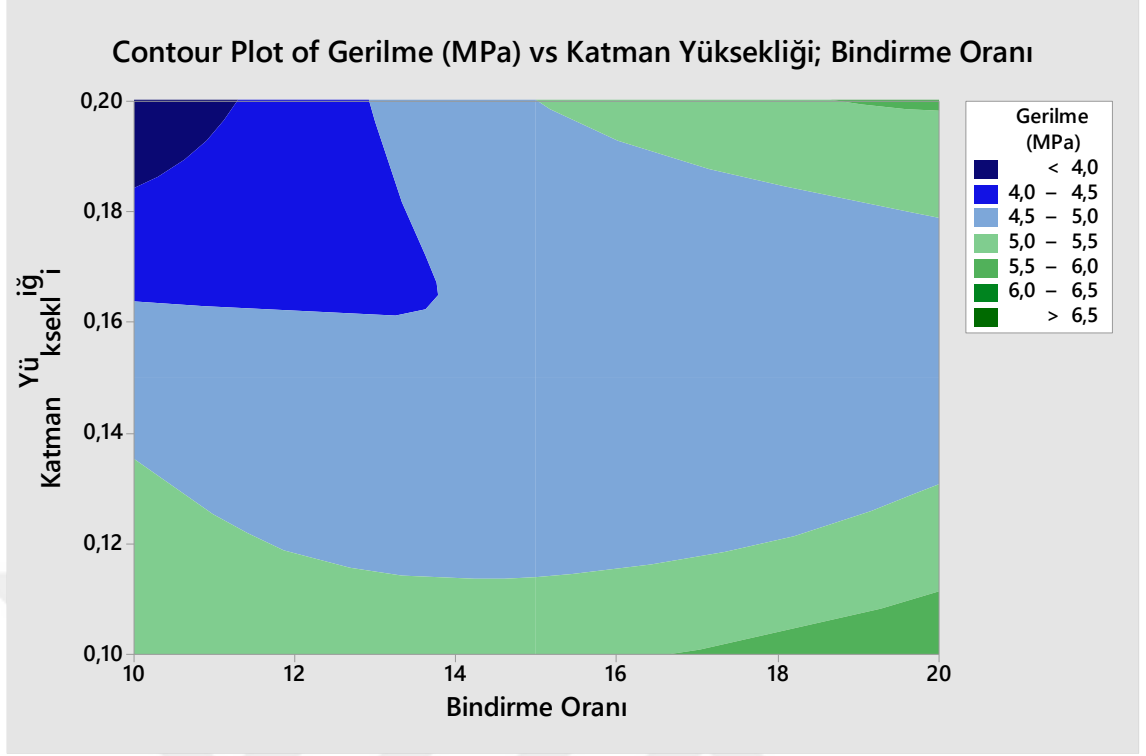
Tablo 4.6. PETG kayma gerilmesi varyans analiz tablosu.

| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|------|-------|
| Model | 9 | 9,107 | 60,72% | 9,10701 | 1,01189 | 0,86 | 0,604 |
| Doğrusal | 3 | 7,4923 | 49,95% | 0,54865 | 0,18288 | 0,16 | 0,922 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 1,0422 | 6,95% | 0,03306 | 0,03306 | 0,03 | 0,874 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 5,5429 | 36,96% | 0,00469 | 0,00469 | 0 | 0,952 |
| Bindirme Oranı | 1 | 0,9072 | 6,05% | 0,5109 | 0,5109 | 0,43 | 0,539 |
| Kare | 3 | 0,9189 | 6,13% | 0,91889 | 0,3063 | 0,26 | 0,852 |
| Katman Yüksekliği*Katman Yüksekliği | 1 | 0,796 | 5,31% | 0,84831 | 0,84831 | 0,72 | 0,435 |
| Nozul sıcaklığı*Nozul sıcaklığı | 1 | 0,1026 | 0,68% | 0,10914 | 0,10914 | 0,09 | 0,773 |
| Bindirme Oranı*Bindirme Oranı | 1 | 0,0203 | 0,14% | 0,02026 | 0,02026 | 0,02 | 0,901 |
| Oran | | | | | | | |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 0,6958 | 4,64% | 0,6958 | 0,23193 | 0,2 | 0,894 |
| Katman Yüksekliği*Nozul sıcaklığı | 1 | 0,0283 | 0,19% | 0,02825 | 0,02825 | 0,02 | 0,883 |
| Katman Yüksekliği*Bindirme Oranı | 1 | 0,49 | 3,27% | 0,48998 | 0,48998 | 0,42 | 0,547 |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme Oranı | 1 | 0,1776 | 1,18% | 0,17756 | 0,17756 | 0,15 | 0,714 |
| Hata | 5 | 5,8913 | 39,28% | 5,89132 | 1,17826 | | |
| Uygunsuzluk | 3 | 4,1453 | 27,64% | 4,14532 | 1,38177 | 1,58 | 0,41 |
| Saf Hata | 2 | 1,746 | 11,64% | 1,746 | 0,873 | | |
| Toplam | 14 | 14,9983 | 100,00% | | | | |

Tablo incelendiğinde PETG malzemesi için belirlenen parametrelerin kayma dayanımına etkisinin %60,72 olduğu görülmektedir. Sayısal olarak en fazla etkiyi gösteren etmen nozul sıcaklığıyken, bindirme oranının bu testte ki diğer parametrelerle birleşimi etkisini oldukça arttırmıştır. Anlaşılacağı üzere katman kalınlığı ve bindirme oranı ilişkisi deneyde en fazla etki eden birleşim olmuştur. İki parametre tekil olarak incelendiğindeyse değerleri oldukça birbirine yakındır. Kontür grafiğinde (Şekil 4.32) katman yüksekliği ve bindirme oranı ilişkisi paylaşılmıştır. PETG cıvata kayma dayanımı gerilme hesabı için Denklem 4.6 oluşturulmuştur.

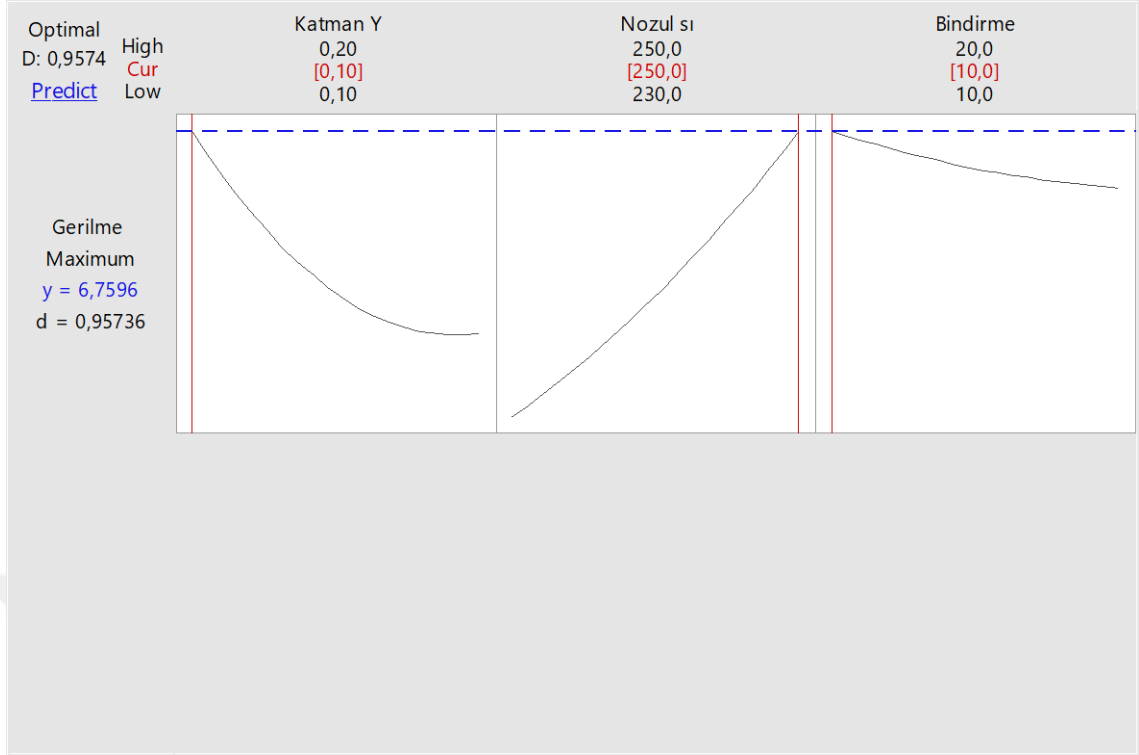
$$\tau(\text{petgk})=71- 45 k- 0,65 n_p+ 0,78 b+ 192 k^2+ 0,00172 n_p^2 \quad (4.6)$$

$$+ 0,0030 b^2- 0,17 k n_p+ 1,40 kb- 0,0042 n_p b$$



Şekil 4.32: PETG kayma dayanımı nozul sıcaklığı ve bindirme oranı kontür grafiği.

Katman yüksekliğinin ve bindirme oranının artışı bu test için negatif sonuçlar doğurduğunu, katman kalınlığı minimum değerdeyken bindirme oranının arttırılarak iyi sonuçlar alınacağını anlaşılmıştır. Genel olarak baktığımızda katman kalınlığı 0,1mm olduğunda bindirme oranının hareketiyle sonuçların iyileştiği görülmüştür. Bu ürün için düşük katman yüksekliği ve yüksek bindirme oranı tercih edilmelidir ve iki parametre aynı anda arttırıldığında gerilmenin azalacağı anlaşılmaktadır. PETG sıcaklığa duyarlı bir malzeme olduğundan katman kalınlığının arttırılması iyi yapışmayı engellemektedir. İlave parametreler eklendiğinde kalınlıkla ve yapışma alanıyla ilgili problem de artacağından gerilme ters yönde etkilenir. PETG kısmen esnek bir yapıya sahiptir ve bu yapı için sıcaklık oldukça önem arz ettiğinden soğuma ve yapışma göz ardı edilmemelidir. Şekil 4.33'de PETG cıvata kayma dayanımı için Minitab'da oluşturulan optimum sonuçlar paylaşılmıştır.

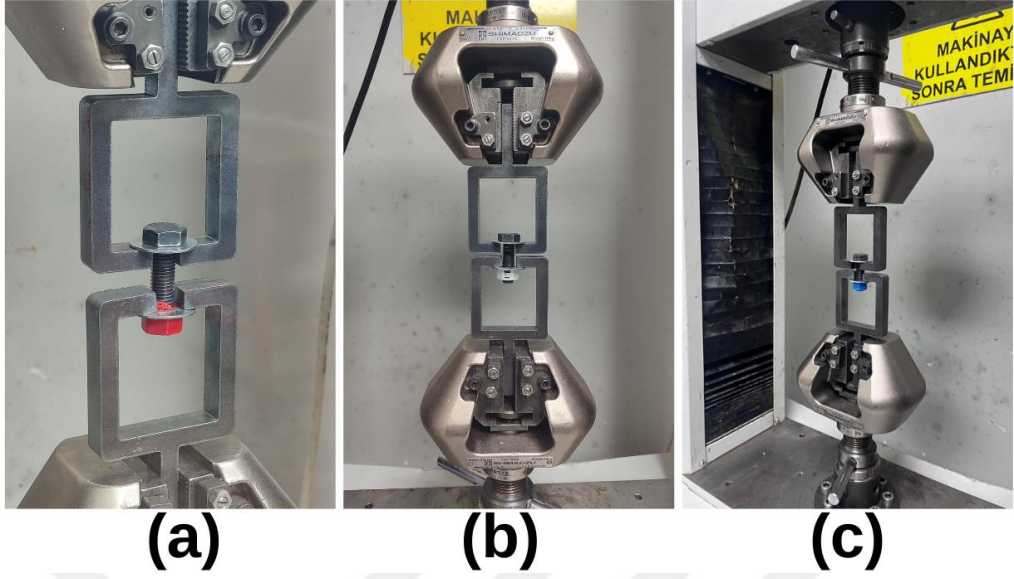


Şekil 4.33: PETG optimum parametre grafiği (kayma gerilmesi).

Grafik incelendiğinde nozul sıcaklığının artışının gerilmeyi pozitif yönde etkilediği, katman yüksekliği ve bindirme oranının artışının negatif yönde etkilediği görülmektedir. PETG malzemesi sıcaklığa oldukça duyarlı olduğundan katmanın kalınlaşması bileşimi azaltmış, malzemenin kısmen esnek oluşundan dolayı kırılmanın hızlı gerçekleşmesine sebep olmuştur. Minitab programının hesaplarına göre ideal deney parametreleri de bu doğrultudadır.

4.3. Somun Diş Dayanımının Araştırılması

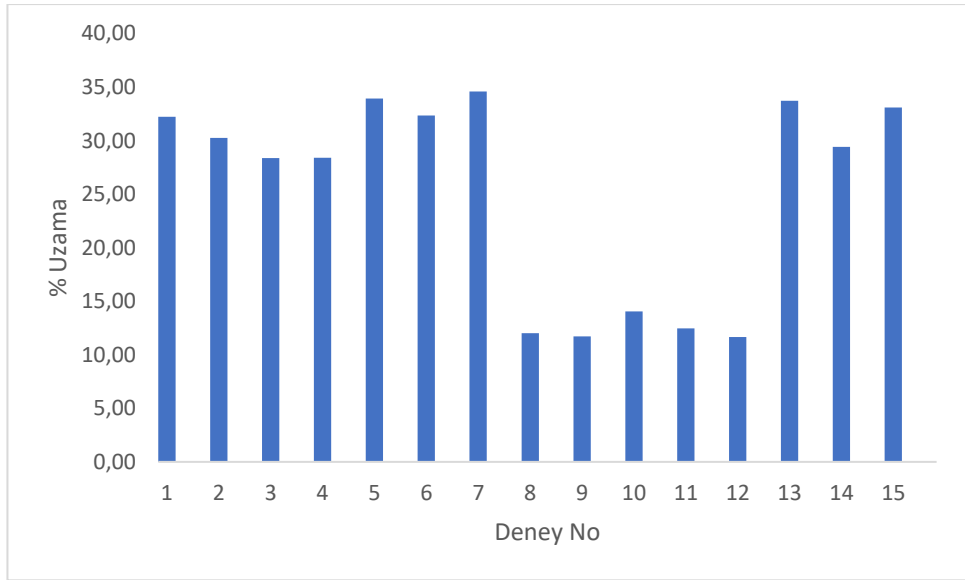
Baskı işlemi gerçekleştirmiş üç malzeme için somun diş sıyrma testi gerçekleştirilmiştir. Test, metal civata ucuna üretilmiş olan somun takılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Aparatlar ve civata, somun arasına pul takılmıştır. İlk boyu (10mm) olarak ayarlanıp, çekme dayanımı işlemi gerçekleştirilmiştir. Test işlemi anından görselde (Şekil 4.34) paylaşılmıştır.



Şekil 4.34: Diş sıyırma testi PETG (a), ABS (b) ve PLA (c)

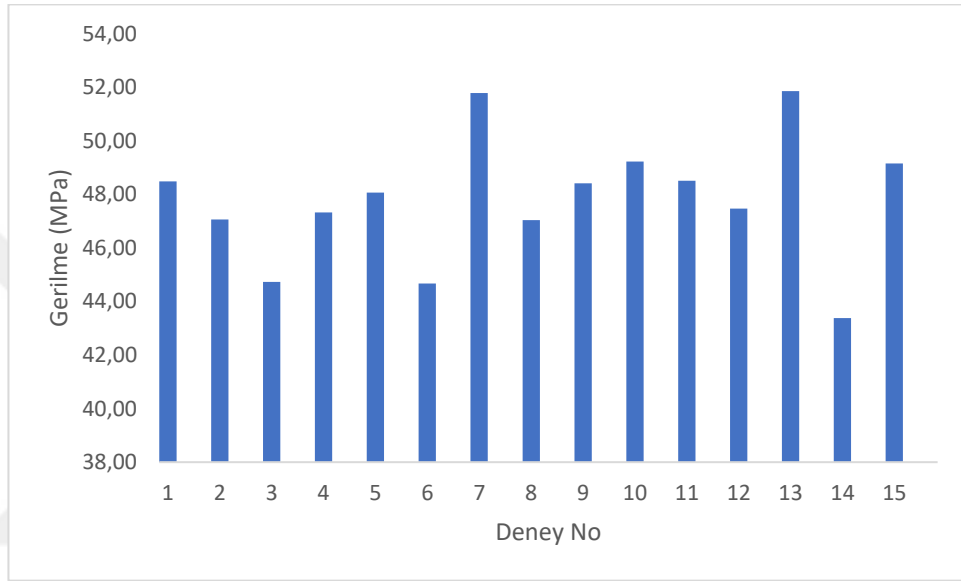
4.3.1. PLA somun diş dayanımı

Üretilen 15 farklı parametreden toplamda 45 adet numune üretilmiştir. Üretilen numuneler diş sıyırma testine tabi tutulmuştur. PLA malzemesi için somun diş dayanımı sonuçları Şekil 4.35’de paylaşılmıştır.



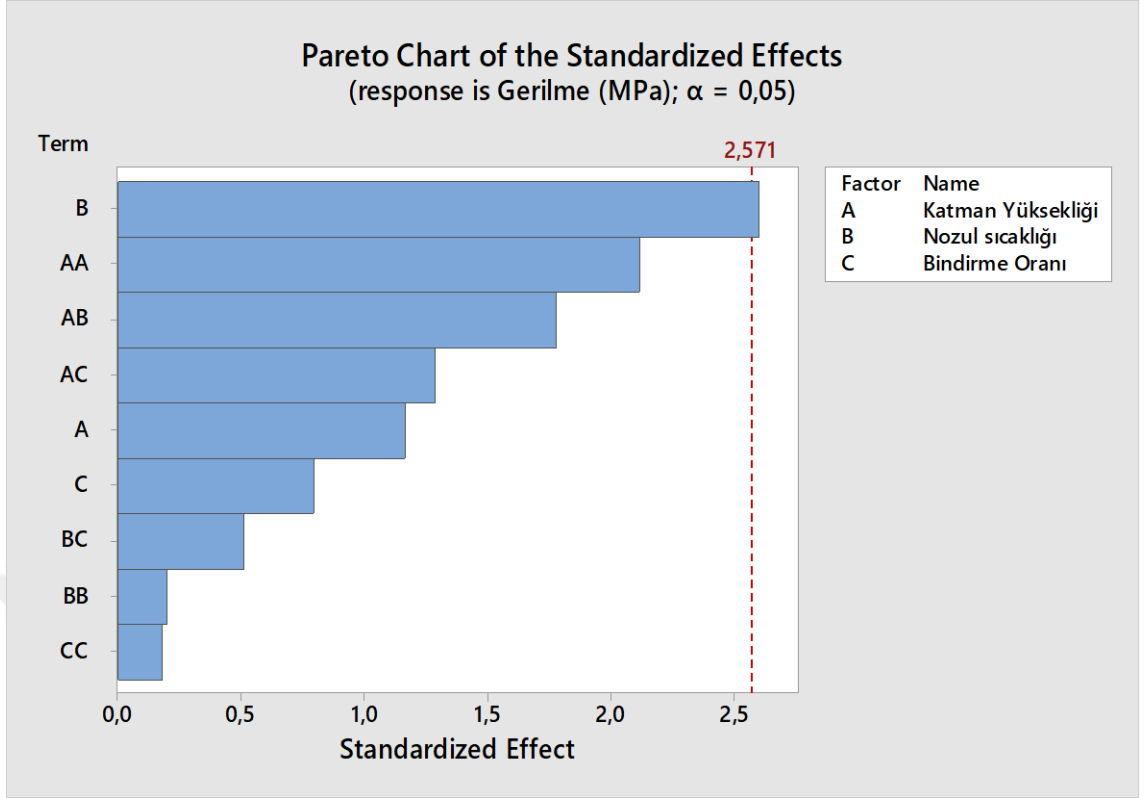
Şekil 4.35: PLA malzemesi somun diş dayanımı % uzama sonuçları.

% uzama için sonuçlar incelendiğinde maksimum uzama sağlayan 7. Deney %34.58'dir. Gerilme kuvvetinin en çok olduğu deneyden (13. deney) Ortalama 0.08 MPa gerilme farklı bulunmaktadır ve yüzde uzamaları arasında ki fark 0.85'dir. İki deneyde de bütün parametreler birbirinden farklıdır. Test sonuçları incelendiğinde 13. deney sonucunda maksimum gerilme kuvvetine ulaşıldığı (51,86 MPa), en düşük gerilme değerininse 14. deneyde (43,39 MPa) olduğu gözlemlenmiştir. Gerilme grafiği Şekil 4.36'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.36: PLA malzemesi somun dış dayanımı gerilme grafiği.

En düşük % uzama sonuçlu PLA deney numunesi %11,73 değer ile 9. deneydir. En düşük gerilme kuvveti ile % uzamaları kıyaslandığında aralarında 11,73 değer farkı mevcuttur ve ortak bir parametreleri yoktur. % uzama sonuçları incelendiğinde en az ve en fazla değer arasında ki tek ortak nokta nozul sıcaklıkları (220°C) olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.37'de PLA çekme deneyine etki eden parametrelerin grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 4.37: PLA parametre etki grafiği (somun dış dayanımı).

Nozul sıcaklığı (B), deneyin en belirleyici tekil parametresidir. Tekil parametrelerden çoktan aza doğru sıralandığında nozul sıcaklığında sonra katman yüksekliği (A) ve bindirme oranı (C) olarak ilerlemektedir. Katman yüksekliğinin kareside oldukça etki etmektedir. Kombinasyonlar incelendiğinde katman yüksekliği- nozul sıcaklığı, katman yüksekliği –bindirme oranı kombinasyonları da sonuçlarda etkisi büyüktür. En az etki eden durum ise bindirme oranının karesidir. Şekil 4.7’de varyans tablosunda oranlar paylaşılmıştır.

Tablo 4.7. PLA kayma gerilmesi varyans analiz tablosu.

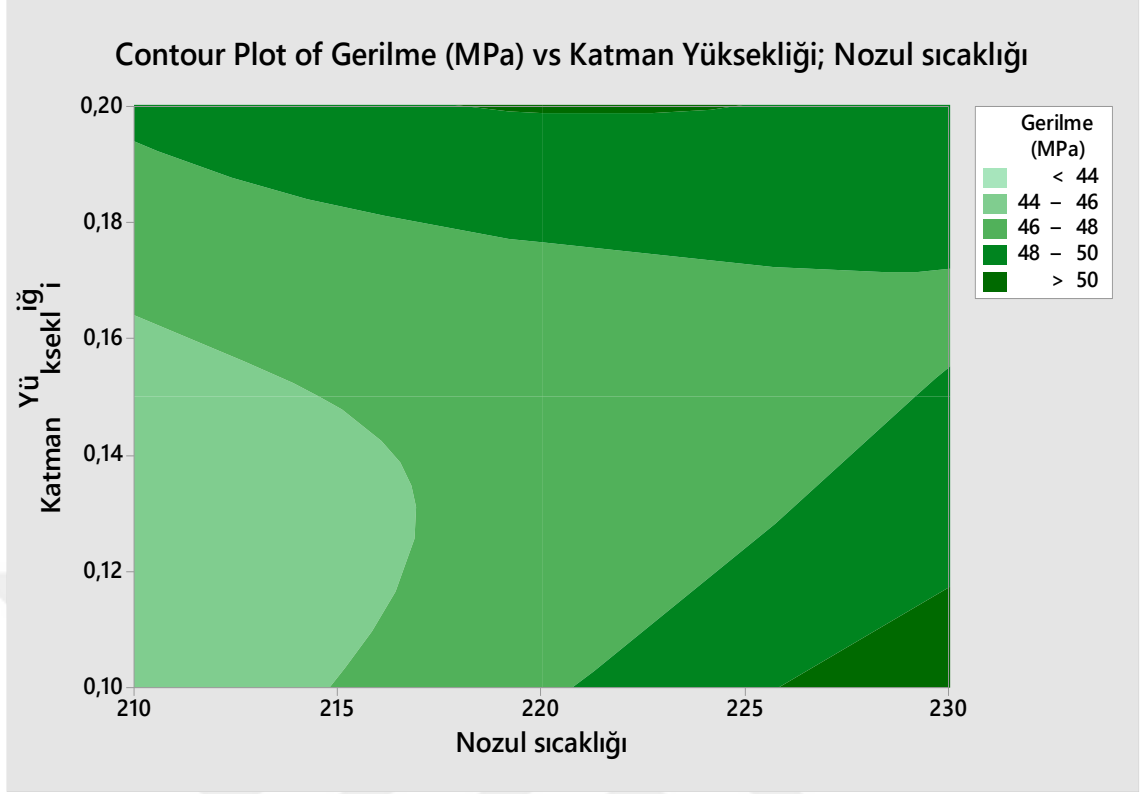
| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------|----|---------|--------|---------|---------|------|-------|
| Model | 9 | 61,1955 | 78,70% | 61,1955 | 6,7995 | 2,05 | 0,222 |
| Doğrusal | 3 | 29,0896 | 37,41% | 29,0896 | 9,6965 | 2,93 | 0,139 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 4,5204 | 5,81% | 4,5204 | 4,5204 | 1,36 | 0,295 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 22,4639 | 28,89% | 22,4639 | 22,4639 | 6,78 | 0,048 |
| Bindirme Oranı | 1 | 2,1053 | 2,71% | 2,1053 | 2,1053 | 0,64 | 0,461 |
| Kare | 3 | 15,284 | 19,66% | 15,284 | 5,0947 | 1,54 | 0,314 |

Tablo 4.7 (devamı):PLA kayma gerilmesi varyans analiz tablosu.

| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|------|-------|
| Katman | 1 | 15,0222 | 19,32% | 14,8356 | 14,8356 | 4,48 | 0,088 |
| Yüksekliği*Katman | | | | | | | |
| Yüksekliği | | | | | | | |
| Nozul sıcaklığı*Nozul sıcaklığı | 1 | 0,1545 | 0,20% | 0,1344 | 0,1344 | 0,04 | 0,848 |
| Bindirme | 1 | 0,1073 | 0,14% | 0,1073 | 0,1073 | 0,03 | 0,864 |
| Oranı*Bindirme Oranı | | | | | | | |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 16,8219 | 21,63% | 16,8219 | 5,6073 | 1,69 | 0,283 |
| Katman | 1 | 10,4811 | 13,48% | 10,4811 | 10,4811 | 3,16 | 0,135 |
| Yüksekliği*Nozul sıcaklığı | | | | | | | |
| Katman | 1 | 5,4712 | 7,04% | 5,4712 | 5,4712 | 1,65 | 0,255 |
| Yüksekliği*Bindirme Oranı | | | | | | | |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme Oranı | 1 | 0,8696 | 1,12% | 0,8696 | 0,8696 | 0,26 | 0,63 |
| Hata | 5 | 16,5622 | 21,30% | 16,5622 | 3,3124 | | |
| Uygunsuzluk | 3 | 10,2614 | 13,20% | 10,2614 | 3,4205 | 1,09 | 0,512 |
| Saf Hata | 2 | 6,3008 | 8,10% | 6,3008 | 3,1504 | | |
| Toplam | 14 | 77,7577 | 100,00% | | | | |

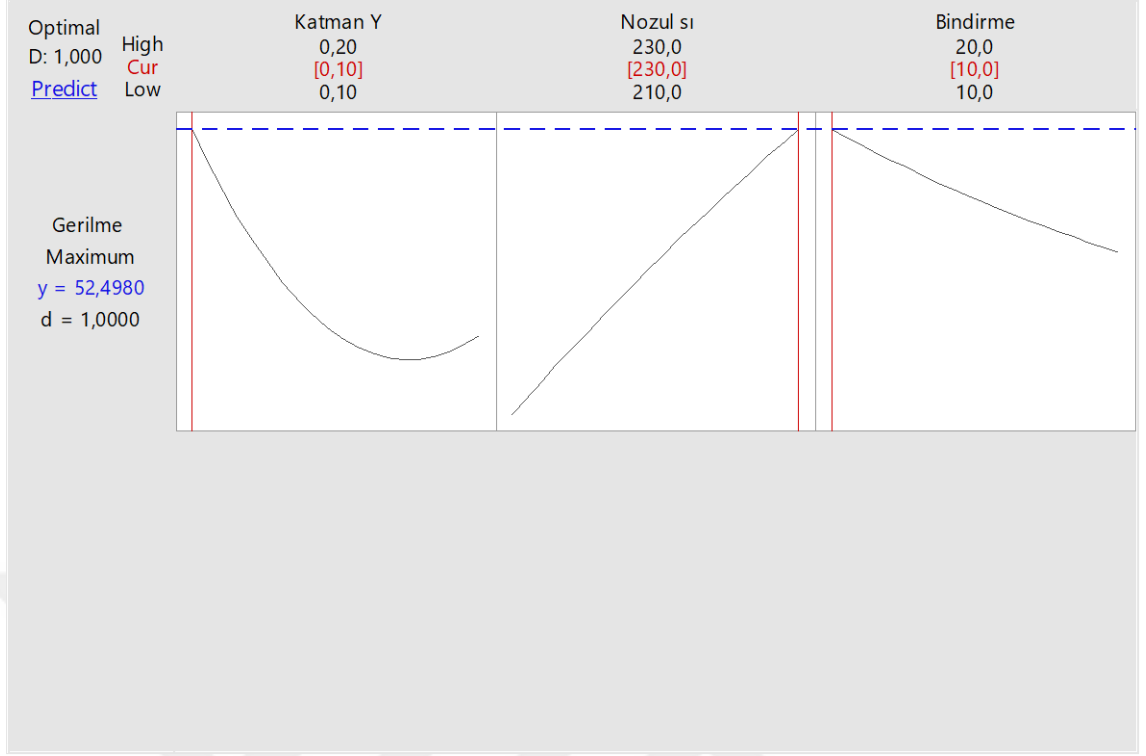
Tablo incelendiğinde belirlenen 3 deney parametresinin etkisinin %78,70 olduğu anlaşılmıştır. Tekil parametrelerden nozul sıcaklığı %28,89 ile en fazla etkileyen faktör olmuştur. En az etki eden oransa bindirme oranıdır. Kare faktörü incelendiğinde deneyi %19,66 oranında etkilemiştir ve katman yüksekliğinin karesi %19,66 ile en fazla değer alan olarak gözlemlenmiştir. Birleşimler incelendiğinde %21,30 etkilemekte olup, %13,48 ile en fazla oran katman yüksekliği- nozul sıcaklığı olmuştur. Şekil 4.38’de nozul sıcaklığı ve katman kalınlığı arasındaki ilişkiyi anlatan kontür grafiği paylaşılmıştır. Gerilme miktarı PLA somun dış sıyırma testi için Denklem 4.7 oluşturulmuştur.

$$\sigma(plas) = -129 + 417k + 1,35n - 3,06b + 802k^2 - 0,00191n^2 + 0,0068b^2 - 3,24kn + 4,68kb + 0,0093nb \quad (4.7)$$



Şekil 4.38: PLA gerilme, katman kalınlığı- nozul sıcaklığı kontür grafiği (somun dış dayanımı).

Kontür grafiği incelendiğinde nozul sıcaklığının artışıyla koyu yeşil alanın arttığı gözlenmiştir. Koyu yeşil renk gerilme kuvvetinin artışı ve renk açıldıkça zayıfladığını ifade eder. Sıcaklık 230°C olduğunda 0,1mm yüksekliğinde PLA somun değeri optimum değerine ulaşmıştı ve bu sıcaklıkta katman kalınlığı 0,15mm dışındaki iki değerde güzel sonuçlar vermiştir. PLA dış sıyırma testi için belirleyici deney parametresi nozul sıcaklığı olmuştur. Katman yüksekliği ve nozul sıcaklığı etkisi de göz önüne alındığında sıcaklığın katmanlar arasındaki yapışma miktarını arttırdığından gerilme sonuçlarını da etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. İdeal parametre hesap grafiği Şekil 4.39'da paylaşılmıştır.

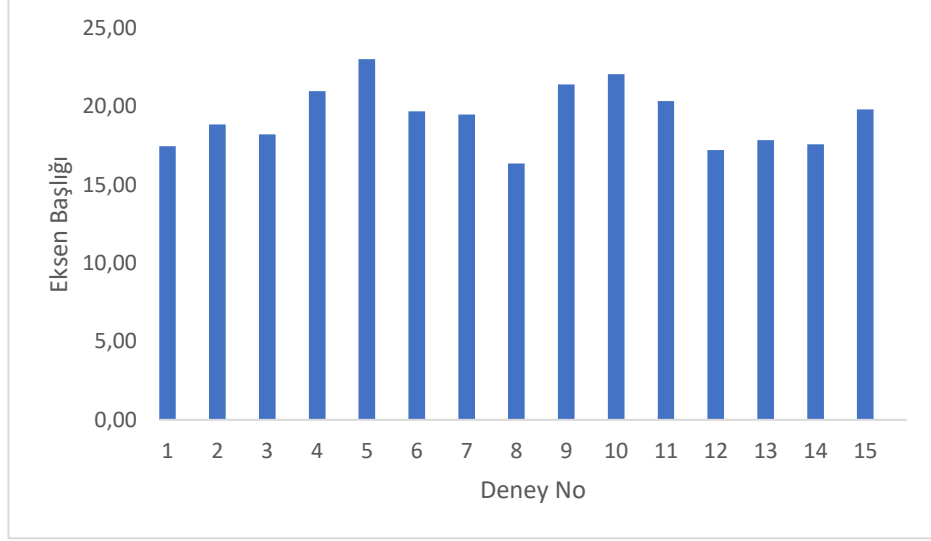


Şekil 4.39: PLA optimum parametre grafiği (somun dış dayanımı).

Verilen maksimum ve minimum deney parametreleri paylaşılmıştır. Test sonuçlarından çıkartılan dış sıyırma 51,78 MPa'dır. Bu deney ise 13. Deneydir. Grafik incelendiğinde optimum deney sonucunun yaklaşık 52,5 MPa olduğu bunun da 230°C sıcaklıkta 0,1mm katman yüksekliğinde ve %10 bindirme oranında gerçekleşebileceği görülmektedir.

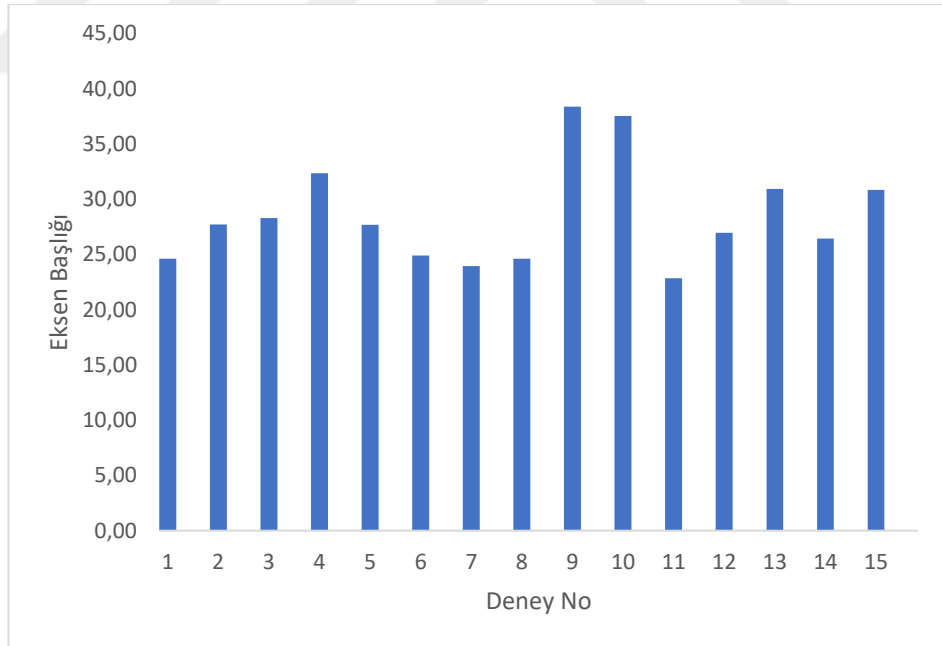
4.3.2. ABS somun dış dayanımı

15 farklı parametreden toplamda 45 adet ABS somun numunesi üretilmiştir. Üretilen numuneler dış sıyırma testine tabi tutulmuştur. ABS mazlemesi için dış sıyırma testi sonuçları Şekil 4.40'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.40: ABS malzemesi somun dış dayanımı % uzama grafiği.

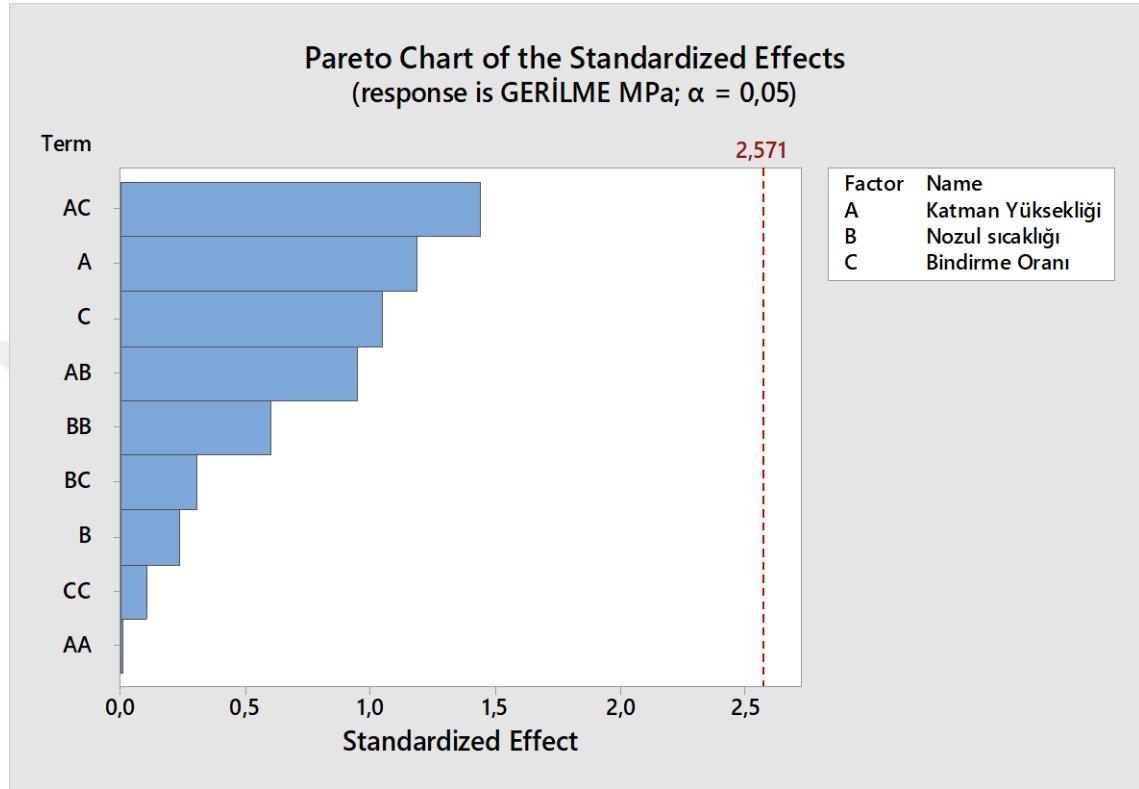
Deney sonuçları incelendiğinde ABS malzemesi için maksimum uzama %23,03 ile 5. deneyde, minimum uzama %16,37 ile 8. deneyde karşılaşılmıştır. İki deney için de ortak parametre sadece nozul sıcaklığı olan 235°C'dir. Şekil 4.41'de gerilme grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 4.41 ABS malzemesi somun dış dayanımı gerilme grafiği.

Gerilme grafiği incelendiğinde maksimum gerilmenin 38,37 MPa ile 9. deneyde olduğu, minimum gerilme kuvvetinin ise 22,93 MPa ile 11. deneyde olduğu gözlemlenmiştir. İki sonuçtaki numuneler için ortak bir parametre bulunmamaktadır. Uzama ve gerilme

karşılaştırıldığında en iyi sonuç veren numunelerin sıcaklık değerlerinin olduğu görülmüştür. Sıcaklık dışında ortak parametreleri bulunmamaktadır. Minimum sonuç veren ABS numunelerinde ise ortak bir baskı parametresi bulunmamaktadır.Şekil 4.42’de deney içerisindeki parametrelerin dağılım grafiği paylaşılmıştır.



Şekil 4.42: ABS parametre etki grafiği (somun dış dayanımı).

Katman kalınlığı ve bindirme oranı tekil etkileri ve kombinasyon etkileri testi oldukça etkilemiştir fakat iki faktör de karelerine bakıldığında oranlarını yitirmiştir. Deneyde etkisi en az gözlemlenen tekil etki nozul sıcaklığı olmuştur.Birleşim etkilerine bakıldığında katman yükseliği-nozul sıcaklığı iyi bir etki göstermiştir. ABS dış sıyırma testi varyans analiz tablosunda (Tablo 4.8) parametrelerin % etkisi paylaşılmıştır.

Tablo 4.8: ABS dış sıyırma testi varyans analiz tablosu.

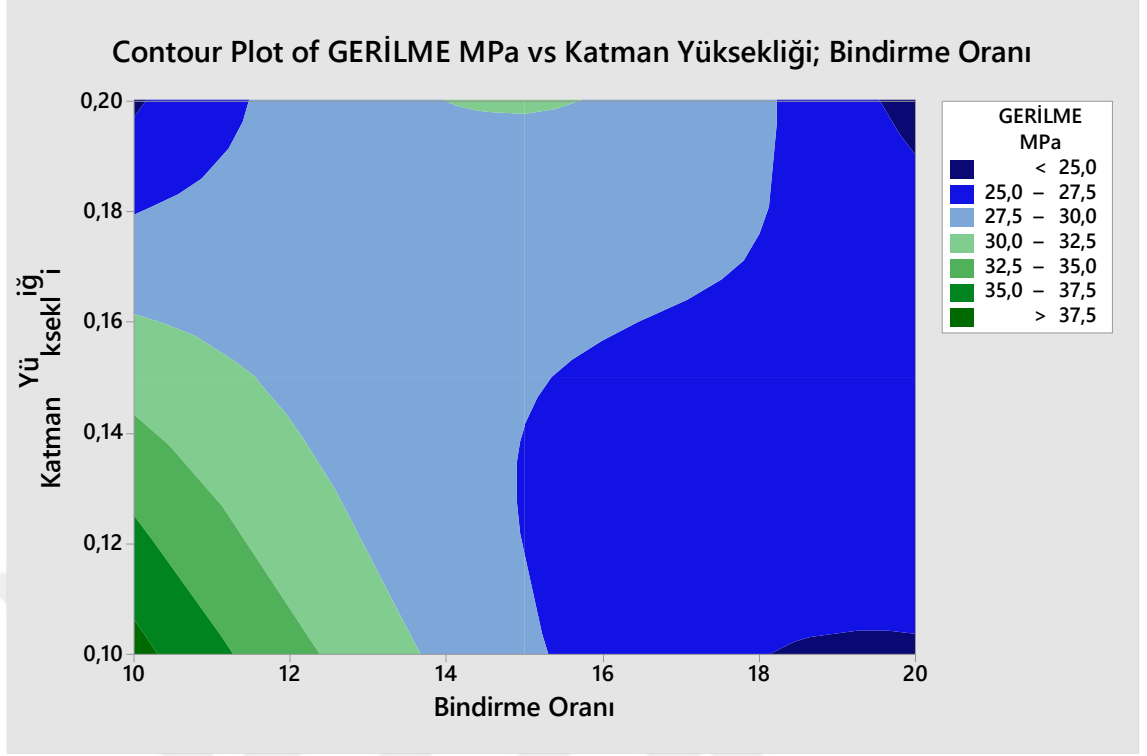
| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------|----|---------|--------|---------|---------|------|-------|
| Model | 9 | 205,138 | 66,33% | 205,138 | 22,7931 | 1,09 | 0,487 |
| Doğrusal | 3 | 133,541 | 43,18% | 53,53 | 17,8432 | 0,86 | 0,521 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 12,243 | 3,96% | 29,4 | 29,3996 | 1,41 | 0,288 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 52,59 | 17,00% | 1,142 | 1,1422 | 0,05 | 0,824 |
| Bindirme Oranı | 1 | 68,708 | 22,22% | 22,988 | 22,9877 | 1,1 | 0,342 |

Tablo 4.8 (devamı): ABS dış sıyırma testi varyans analiz tablosu.

| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|---------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| Kare | 3 | 7,652 | 2,47% | 7,652 | 2,5507 | 0,12 | 0,943 |
| Katman | 1 | 0,078 | 0,03% | 0,002 | 0,0022 | 0 | 0,992 |
| Yüksekliği*Katman | | | | | | | |
| Yüksekliği | | | | | | | |
| Nozul sıcaklığı*Nozul sıcaklığı | 1 | 7,336 | 2,37% | 7,497 | 7,4968 | 0,36 | 0,575 |
| Bindirme | 1 | 0,238 | 0,08% | 0,238 | 0,2383 | 0,01 | 0,919 |
| Oranı*Bindirme Oranı | | | | | | | |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 63,945 | 20,68% | 63,945 | 21,3149 | 1,02 | 0,456 |
| Katman | 1 | 18,879 | 6,10% | 18,879 | 18,8789 | 0,91 | 0,385 |
| Yüksekliği*Nozul sıcaklığı | | | | | | | |
| Katman | 1 | 43,125 | 13,94% | 43,125 | 43,1253 | 2,07 | 0,21 |
| Yüksekliği*Bindirme Oranı | | | | | | | |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme Oranı | 1 | 1,941 | 0,63% | 1,941 | 1,9407 | 0,09 | 0,772 |
| Hata | 5 | 104,137 | 33,67% | 104,137 | 20,8274 | | |
| Uygunsuzluk | 3 | 103,249 | 33,38% | 103,249 | 34,4163 | 77,53 | 0,013 |
| Saf Hata | 2 | 0,888 | 0,29% | 0,888 | 0,4439 | | |
| Toplam | 14 | 309,275 | 100,00% | | | | |

Sonuçlar bakıldığında deney için seçilen 3 parametrenin etkisi %66,33 olduğu görülmüştür. Tekil parametreler incelendiğinde %17 oran ile nozul sıcaklığının etkisi ve %22,22 ile bindirme oranının en yüksek etkiyi verdiği görülmüştür. İkili kombinasyonlar incelendiğinde (%20,68) birleşim etkisinin en fazla etkiye sahip olduğu (%13,94) görülmüştür. Parametre karelerinin etkisi (%2,47), nozul sıcaklığında maksimum değeri (%2,37) alınmıştır. Dağılım grafiği ve tablo karşılaştırıldığında katman yüksekliğinin baskın olma sebebi ikili kombinasyon sonucudur. Kontür grafiği incelendiğinde (Şekil 4.43) bindirme oranı ve katman kalınlığı dağılımı görülmektedir. Denkem 4.8'de gerilmenin PLA dış sıyırma testi için hesabı paylaşılmıştır.

$$\sigma(abss) = 1001 - 1240k - 7,3n_a - 6,1b - 10k^2 + 0,0142n_a^2 + 0,0102b^2 + 4,34kn_a + 13,13kb + 0,0139nb \quad (4.8)$$



Şekil 4.43: ABS gerilme, katman kalınlığı- bindirme oranı kontür grafiği (somun dış dayanımı).

Koyu mavi renklerin maksimum katman yüksekliğinde (0,2mm) ve maksimum bindirme oranında arttığı gözlemlenmiştir. Koyu mavi renk zayıf gerilme kuvvetini temsil etmektedir. Sonuç iyileşmesi yeşil bölgede gerçekleşmekte olup, 0,15mm de %10-%15 arasında gerçekleşmektedir. En iyi sonuçlar 0,1mm ve %10 parametrelerinde karşılaşılmıştır. Optimum parametre grafiği Şekil 4.44'de paylaşılmıştır.

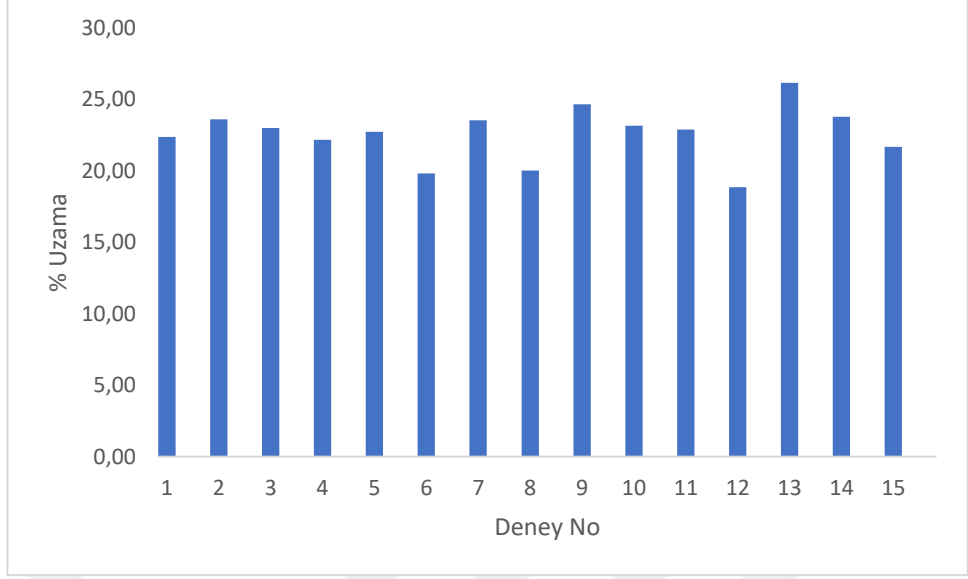


Şekil 4.44: ABS optimum parametre grafiği (somun dış dayanımı).

Maksimum ve minimum parametreler arasında oluşan gerilme kuvvetleri incelenmiştir. Yapılan deneylerde ABS dış sıyırma testi için deney sonuçlarında ulaşılan gerilme 38,37 MPa'dır ve bu sonuç 9. deneyde görülmüştü. 9. deney parametrelerine bakıldığında minimum katman yükseliği ve bindirme oranında ortalama sıcaklık değerindeydi. Grafik incelendiğinde tüm deney parametreleri minimumken optimum gerilme (37,1 MPa) kuvvetine erişeceği görülmüştür.

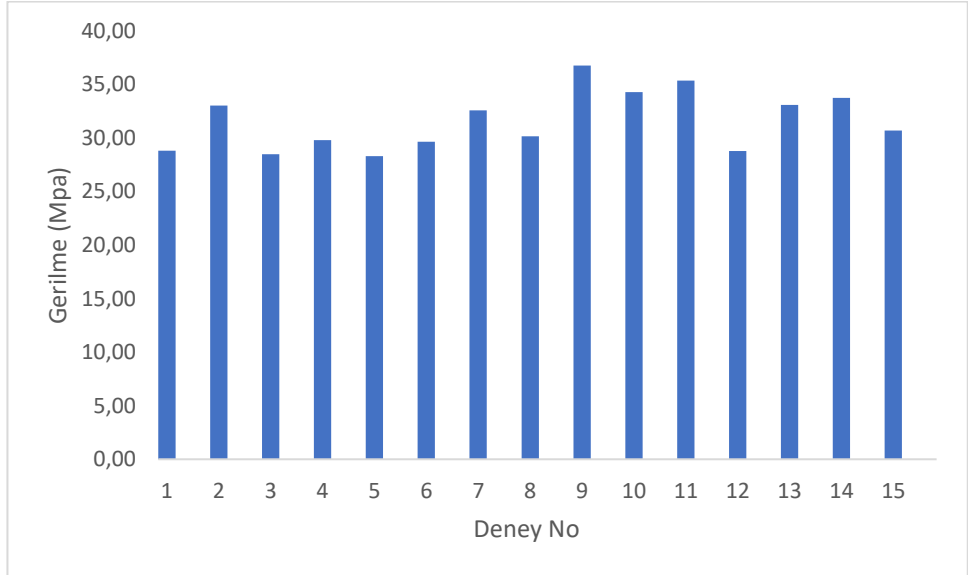
4.3.3. PETG somun dış dayanımı

Üretilen 15 farklı parametreden toplamda 45 adet numune üretilmiştir. Üretilen numuneler dış sıyırma testine tabi tutulmuştur. PETG mazlemesi için çekme dayanımı % uzama sonuçları Şekil 4.45'de paylaşılmıştır.



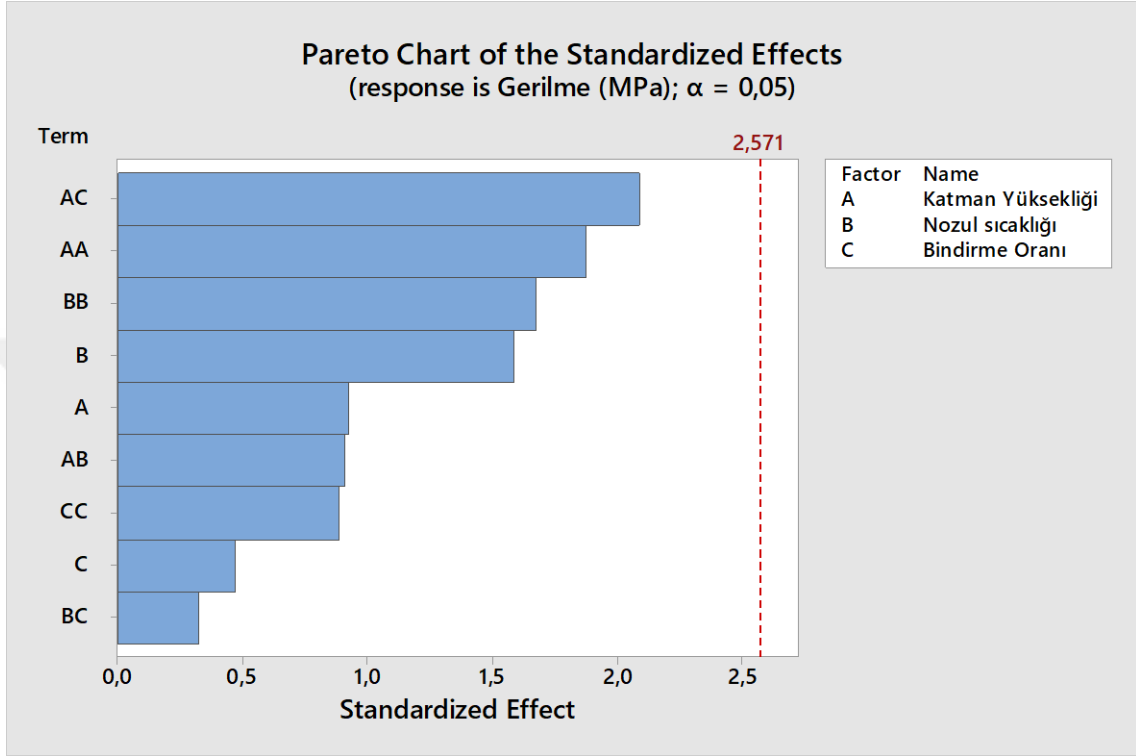
Şekil 4.45: PETG malzemesi somun diş dayanımı % uzama grafiği.

Grafik incelendiğinde en fazla uzama oranının %26,18 13.deneye, en az uzamanın ise %18,87 ile 12. deneye aittir. Genel olarak karşılaştırıldığında ürünlerin esneklik sınırları arasında kaldığı uzama oranının %15-%20 arasında seyir ettiği gözlenmiştir. İki deneyin de parametreleri karşılaştırıldığında bindirme oranı dışında ortak bir parametreleri olmadığı görüşmüştür. Gerilme – deney grafiği Şekil 4.46’da paylaşılmıştır.



Şekil 4.46: PETG malzemesi somun diş dayanımı gerilme grafiği.

Gerilme grafiği incelendiğinde maksimum gerilme 9. deneyde (36,77 MPa), minimum gerilme ise (28,30 MPa) 5. Deneyde gözlemlenmiştir. İki deneyin parametreleri karşılaştırıldığında sıcaklık etkenin aynı olduğu görölmektedir. Başka ortak bir parametreleri bulunmamaktadır. Deneye etki eden faktörler Şekil 4.47’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.47: PETG parametre etki grafiği (somun diş dayanımı).

Grafik incelendiğinde en fazla etkinin nozul sıcaklığı ve bindirme oranı olduğu gözlemlenmiştir. PETG somun diş sıyrma testi için oluşturulan bu grafik incelendiğinde parametre kareleri oldukça fazla bir etkide olduğu görölmüştür. Grafikte en az etkiyi alan parametre bindirme oranı olarak görölmektedir. Varyans tablosunda sayısal veriler (Tablo 4.9) detaylıca incelenmiştir.

Tablo 4.9. PETG diş sıyrma testi varyans analiz tablosu.

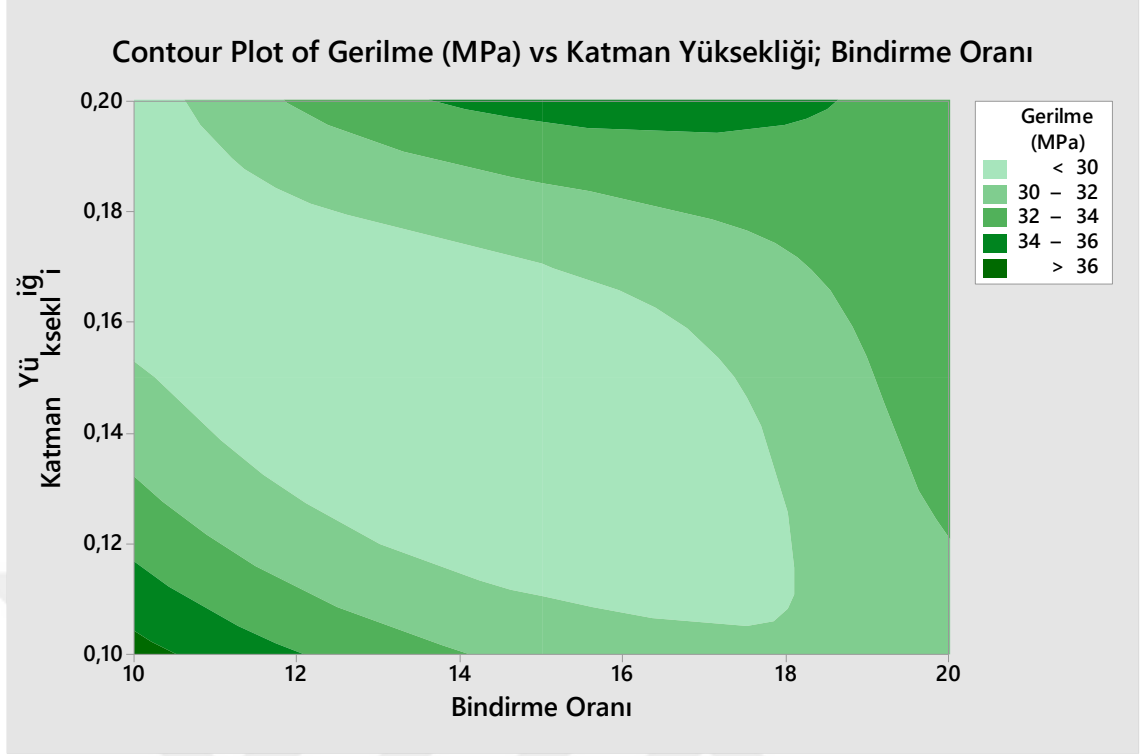
| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------|----|--------|--------|---------|---------|------|-------|
| Model | 9 | 73,616 | 70,60% | 73,6161 | 8,1796 | 1,33 | 0,393 |
| Doğrusal | 3 | 2,536 | 2,43% | 22,0855 | 7,3618 | 1,2 | 0,399 |
| Katman Yüksekliği | 1 | 0,234 | 0,22% | 5,258 | 5,258 | 0,86 | 0,397 |
| Nozul sıcaklığı | 1 | 0,834 | 0,80% | 15,4786 | 15,4786 | 2,52 | 0,173 |
| Bindirme Oranı | 1 | 1,467 | 1,41% | 1,3489 | 1,3489 | 0,22 | 0,659 |

Tablo 4.9 (devamı): PETG dış sıyırma testi varyans analiz tablosu.

| Kaynak | DF | Seq SS | Katkı | Adj SS | Adj MS | F | P |
|-------------------------------------|----|---------|---------|---------|---------|--------|-------|
| Kare | 3 | 38,457 | 36,88% | 38,4571 | 12,819 | 2,09 | 0,22 |
| Katman Yüksekliği*Katman Yüksekliği | 1 | 17,739 | 17,01% | 21,5416 | 21,5416 | 3,51 | 0,12 |
| Nozul sıcaklığı*Nozul sıcaklığı | 1 | 15,912 | 15,26% | 17,1874 | 17,1874 | 2,8 | 0,155 |
| Bindirme Oranı*Bindirme Oranı | 1 | 4,806 | 4,61% | 4,8064 | 4,8064 | 0,78 | 0,416 |
| 2- Yönlü Etkileşim | 3 | 32,623 | 31,29% | 32,6234 | 10,8745 | 1,77 | 0,268 |
| Katman Yüksekliği*Nozul sıcaklığı | 1 | 5,113 | 4,90% | 5,1128 | 5,1128 | 0,83 | 0,403 |
| Katman Yüksekliği*Bindirme Oranı | 1 | 26,865 | 25,76% | 26,8649 | 26,8649 | 4,38 | 0,091 |
| Nozul sıcaklığı*Bindirme Oranı | 1 | 0,646 | 0,62% | 0,6458 | 0,6458 | 0,11 | 0,759 |
| Hata | 5 | 30,657 | 29,40% | 30,657 | 6,1314 | | |
| Uygunsuzluk | 3 | 30,543 | 29,29% | 30,543 | 10,181 | 178,56 | 0,006 |
| Saf Hata | 2 | 0,114 | 0,11% | 0,114 | 0,057 | | |
| Toplam | 14 | 104,273 | 100,00% | | | | |

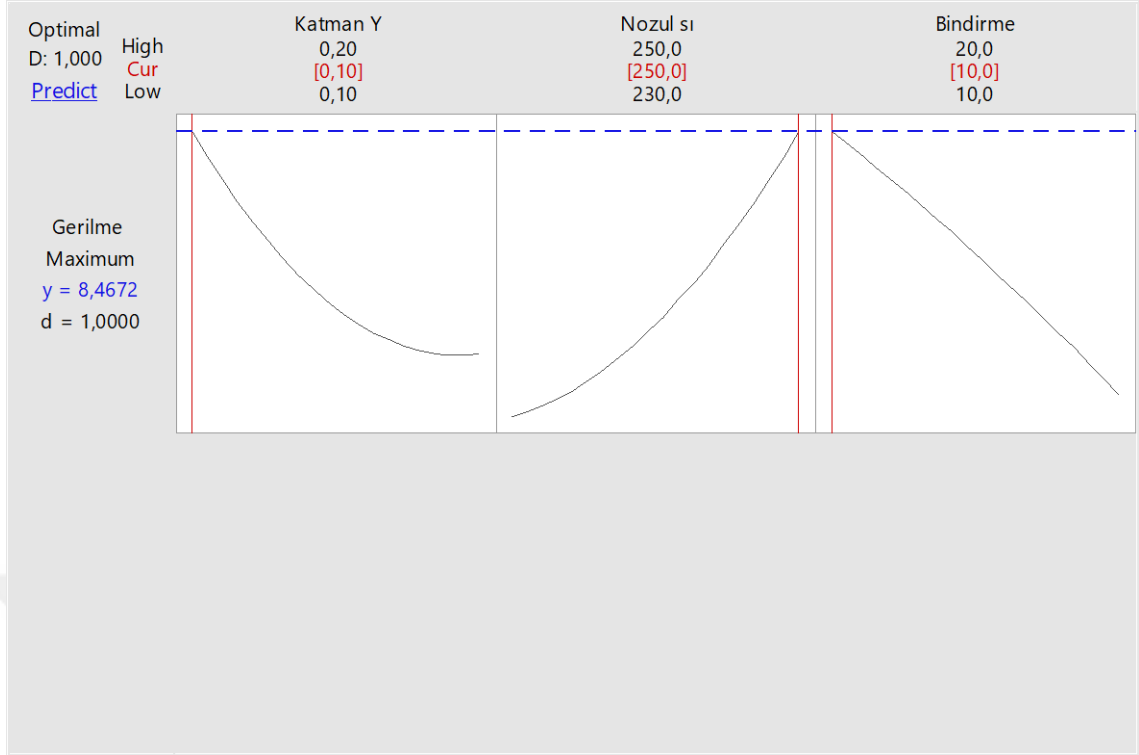
Genel olarak bakıldığında gerçekleştirilen bu test için seçilmiş olan deney parametrelerinin etkisi %70,60'dir. Diğer dış sıyırma testlerinden farklı olarak PETG, tekil parametre etkilerinin az görüldüğü (%2,43), en yüksek oranın da parametre karelerinin olduğu (%36,88), birleşim fonksiyonun da oldukça yüksek değere (%31,29) sahip olduğu anlaşılmıştır. Birleşimler incelendiğinde en yüksek oran katman yüksekliği ve bindirme oranı olduğu görülmüştür. PETG malzemesi kimyasal yapısı dolayısıyla diğer testlerden farklı bir sonuç çıkarmıştır. Deney sırasında en çok etki gösteren etki kontür grafiğinde (Şekil4.48) incelenmiştir. Gerilme miktarının parametreler üzerindeki durumunu Denklem 4.9 ile sayısal olarak hesaplamak mümkündür.

$$\sigma(\text{PETGs}) = -129 + 417k + 1,35n_p - 3,06b + 802k^2 - 0,00191n_p^2 + 0,0068b^2 + 3,24kn_p + 4,68kb + 0,0093n_p b \quad (4.9)$$



Şekil 4.48: PETG gerilme, katman kalınlığı- bindirme oranı kontür grafiği (somun dış dayanımı).

Kontür grafiği incelendiğinde bindirme oranının ve katman yüksekliğinin minimumda olmasıyla deneyin en iyi sonuca ulaştığı görülmüştür. Oranlar ortalama deney parametrelerinde gerilmeye zayıflama göstermiş, bindirme oranı %15 katman yüksekliği 0,2mm olduğunda iyi sonuçlar alınmıştır. Mekanik sonuçların optimum değeri için deney parametrelerinin Şekil 4.49’da detaylı incelenmesi paylaşılmıştır.



Şekil 4.49: PETG optimum parametre grafiği (somun dış dayanımı).

Grafik incelendiğinde y değeri gerilme için optimum miktarı paylaşmıştır. Gerilmenin ideal değeri 8,47 MPa da olduğu kısımda deney parametrelerinden katman yüksekliği ve bindirme oranının minimum seviyede tutulması, sıcaklığında en yüksek değerini alması gerekmektedir. Yüksek sıcaklık ve ince katman kalınlığı yapışma oranını arttıracığından sonuçlarda yüksek değeri alması oldukça muhtemeldir ki kontür grafiğinde de aynı etki görülmüştür.

4.4. Genel Değerlendirme

PETG, ABS ve PLA malzemelerine yapılan tetlerin sonuçları oluşturulmuştur. Tablo 6.1'de gerilme sonuçları paylaşılmıştır.

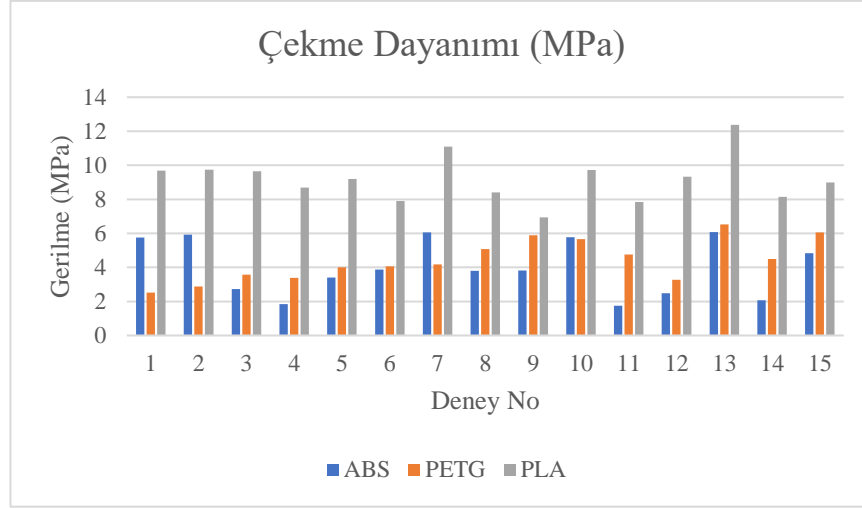
Tablo 4.10: Deney gerilme sonuçları

| Deney No | Çekme Dayanımı (MPa) | | | Kayma Dayanımı (MPa) | | | Somun Dış Dayanımı (MPa) | | |
|----------|----------------------|------|------|----------------------|------|-------|--------------------------|-------|-------|
| | ABS | PETG | PLA | ABS | PETG | PLA | ABS | PETG | PLA |
| 1 | 5,75 | 2,51 | 9,68 | 4,50 | 3,54 | 12,42 | 24,60 | 28,81 | 48,48 |
| 2 | 5,92 | 2,87 | 9,74 | 7,17 | 4,79 | 11,75 | 27,72 | 33,04 | 47,07 |
| 3 | 2,72 | 3,57 | 9,64 | 5,57 | 5,57 | 12,07 | 28,30 | 28,49 | 44,73 |
| 4 | 1,84 | 3,38 | 8,69 | 4,34 | 4,34 | 12,01 | 32,34 | 29,80 | 47,33 |

Tablo 4.10 (devamı): Deney gerilme sonuçları

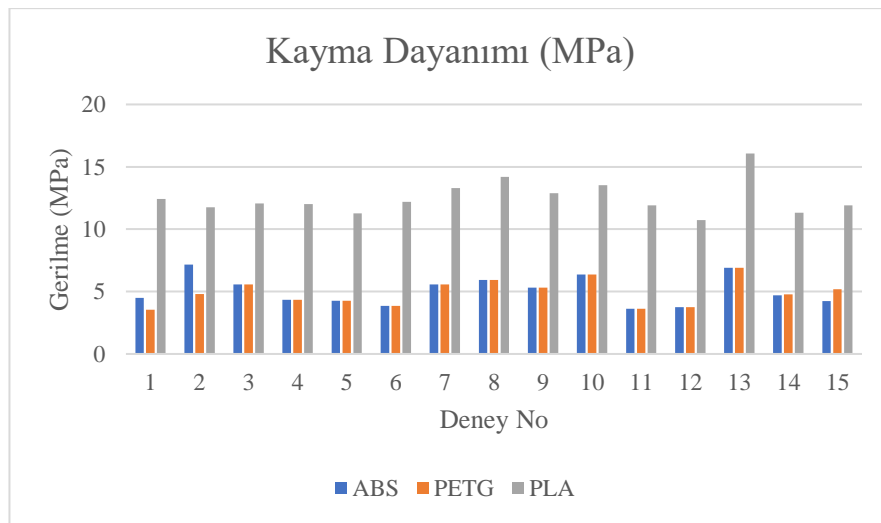
| Deney No | Çekme Dayanımı (MPa) | | | Kayma Dayanımı (MPa) | | | Somun Dış Dayanımı (MPa) | | |
|----------|----------------------|------|-------|----------------------|------|-------|--------------------------|-------|-------|
| | ABS | PETG | PLA | ABS | PETG | PLA | ABS | PETG | PLA |
| 5 | 3,41 | 4,00 | 9,20 | 4,26 | 4,26 | 11,27 | 27,69 | 28,30 | 48,06 |
| 6 | 3,88 | 4,06 | 7,90 | 3,84 | 3,84 | 12,19 | 24,91 | 29,63 | 44,67 |
| 7 | 6,06 | 4,17 | 11,10 | 5,56 | 5,56 | 13,30 | 23,96 | 32,56 | 51,78 |
| 8 | 3,80 | 5,07 | 8,40 | 5,94 | 5,94 | 14,20 | 24,60 | 30,16 | 47,04 |
| 9 | 3,81 | 5,89 | 6,94 | 5,31 | 5,31 | 12,88 | 38,37 | 36,77 | 48,41 |
| 10 | 5,77 | 5,66 | 9,72 | 6,36 | 6,36 | 13,53 | 37,54 | 34,29 | 49,22 |
| 11 | 1,74 | 4,76 | 7,84 | 3,63 | 3,63 | 11,92 | 22,83 | 35,36 | 48,51 |
| 12 | 2,49 | 3,28 | 9,32 | 3,76 | 3,76 | 10,73 | 26,97 | 28,77 | 47,47 |
| 13 | 6,07 | 6,52 | 12,38 | 6,90 | 6,90 | 16,07 | 30,93 | 33,08 | 51,86 |
| 14 | 2,07 | 4,49 | 8,14 | 4,69 | 4,78 | 11,31 | 26,43 | 33,74 | 43,39 |
| 15 | 4,83 | 6,05 | 8,98 | 4,25 | 5,19 | 11,92 | 30,84 | 30,70 | 49,15 |

Deney sonuçları cıvata çekme testleri için incelendiğinde mekanik anlamda en iyi sonucu diğer iki malzemenin neredeyse iki katı değerinde olan PLA malzemesi (%12,38) vermiştir. PETG ve ABS malzemeleri hemen hemen birbirine yakın değerlerde olup % uzama miktarları da oldukça yakındır. Gerilmeleri incelendiğinde PLA malzemesinin en fazla gerilme miktarına sahip olduğu (5,89 MPa), PETG (4,28 MPa) ve ABS(4,14 MPa) malzemelerinin birbirlerine yakın değerler aldığı gözlemlenmiştir. Test için en zayıf sonucu ABS cıvatası göstermiştir. Bütün testler için baskı sıcaklıkları önem arz ederken en yüksek yazdırma sıcaklığı ABS malzemede olmuş, PLA malzemesi için diğer malzemelerle kıyaslandığında düşüktür. PLA malzemesinde bindirme oranı önem arz ederken ABS ve PETG malzemede bu önemi katman kalınlığı arz etmiştir. Cıvata numunelerinde baş kısmına yakın bölgelerden kırılmalar gerçekleşmiştir. PLA malzemesinde gevrek kırılma görülürken, ABS ve PETG malzemede sünek kopmalar gözlemlenmiştir. Kopma şekillerinin farklı olmasının en büyük nedeni malzemelerin kimyasal yapılarıdır. Şekil 4.50’de cıvata çekme dayanımı grafiği paylaşılmıştır.



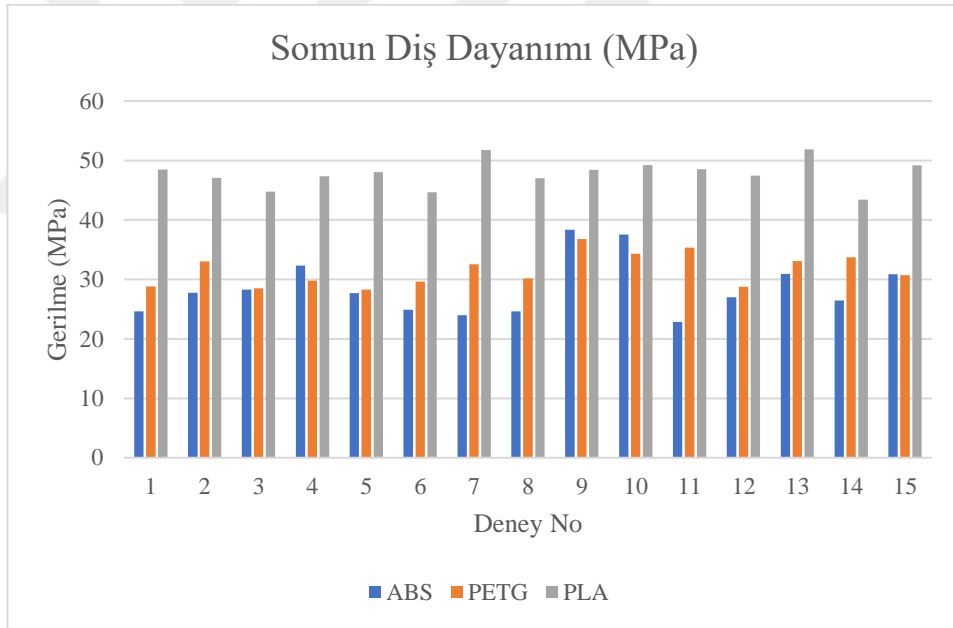
Şekil 4.50: Cıvata çekme dayanımı sonuç grafiği

Kesme testleri incelendiğinde 3 malzeme için kırılma-kopma iki noktadan gerçekleşmiştir. Test düzeneği için incelendiğinde % uzama miktarı en fazla olan malzeme PLA (%39,75) en düşük olan ise PETG (%25,56) olduğu görülmüştür. ABS malzemesi PETG malzemesine kıyaslandığında daha esnek özellikler göstererek %26,53 oranda uzamıştır. Gerilme özelliklerini incelediğimizde yine en iyi sonucu 16,07 MPa' PLA malzemesinde, en zayıf gerilme ise PETG malzemesinde (6,90 MPA) gözlemlenmiştir. PETG malzemesinin malzeme içeriğinden dolayı bindirme oranı ve katman kalınlığı sıcaklık kadar etki etmesede oldukça önemli bir etki göstermiştir. Şekil 4.51'de cıvata kayma dayanımları sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.51: Cıvata kayma dayanımı sonuç grafiği.

Yapılan diş sıyırma testinde % uzamalar incelendiğinde oranı en düşük malzeme ABS, en yüksek oranlı olan ise PLA olmuştur. PETG malzemesi sonuçları ABS ile oldukça yakındır. Somunlar için gerçekteştirilmiş olan diş sıyırma testleri incelendiğinde gerilme oranı en yüksek olan malzeme PLA olarak saptanmıştır. ABS ve PETG malzemelerin gerilme miktarları birbirlerine yakinken, PETG malzemesi ve ABS malzemesi için katman yüksekliği – bindirme oranı büyük bir etki sergilemiştir. PLA için bu nozul sıcaklığı - katman kalınlığı fonksiyonları olmuştur. PLA malzemesinde katman kalınlığının azalması sıcaklık artışıyla birlikte katmanlar arası yapıştırmayı arttırdığından gerilme miktarında artışa sebep olmuştur. ABS ve PETG kimyasal yapılarından dolayı katman kalınlığı - bindirme oranı fonksiyonları birleştiğinde kendileri için daha iyi değerler verdikleri gözlemlenmiştir. ABS ve PETG malzemelerde dişlerin dışa kaydığı, PLA malzemelerde büyük değişim olmadığı görülmüştür. Şekil 4.52’de somun diş dayanım grafiği verilmiştir.



Şekil 4.52: Somun diş dayanımı sonuç grafiği.

Genel olarak bakıldığında tüm testler için mekanik özellikleri en iyi şekilde gösteren malzeme PLA, neredeyse en zayıf özellikleri gösteren malzeme de ABS malzemesi olmuştur.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

FDM yöntemi ile üretilen M12 somun ve cıvata bağlantı elemanları ABS, PETG ve PLA malzemeler sıcaklık, bindirme oranı ve katman kalınlığı parametrelerince incelenmiştir. Yapılan çalışmada cıvatalara çekme ve kayma dayanımı testleri, somun bağlantı elemanlarına ise diş sıyırma testi uygulanmıştır.

- Sonuçları tüm testler için en iyi olan malzeme PLA'dır.
- ABS malzeme diş sıyırma dayanımı testi dışındaki diğer testlerde PETG malzemesinden daha iyi sonuçlar vermiştir.
- PLA malzemesinde gevrek, ABS malzemesinde sünek kopma görülmüştür. PETG malzeme yarı sünek kopma davranışı sergilemiştir.
- ABS ve PETG hemen hemen tüm testlerde birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

Yapılan çalışmada üç farklı termoplastik malzeme FDM yöntemi ile üretilerek çekme, diş sıyırma ve kesme gerilmeleri incelenmiştir. En iyi mekanik performans gösteren malzemenin PLA olduğu anlaşılmıştır. PLA malzemesi her kullanıcı için uygun oluşu, düşük sıcaklıklarda yazdırılabildiği ve daha ucuz olduğundan, uygulaması ve erişimi kolaydır. Daha sonraki yapılacak olan çalışmalarda:

- Farklı boyuttaki cıvatalar ve somunlar test edilebilir.
- Kullanılan malzemeler arttırılabilir veya alaşımli formları test edilebilir.
- Bu çalışmada hexagon iç yapısı ile yazdırma gerçekleştirilmiştir. Farklı iç yapı örgüleri ile dayanım ve yüzde uzama farktörleri incelenebilir.
- Çalışmada kullanılan parametrelerden farklı olarak yeni bir parametre eklenip kombinasyonları gözlemlenebilir.

- Doluluk oranı bu çalışma için % 80'dir. Farklı doluluk oranları ile mekanik özellikler tekrar test edilebilir.
- Üretimi yapılmış olan civatalar dik şekilde üretilmiştir. Farklı yazdırma açıları uzama ve gerilme miktarını etkileyebileceğinden, test edilebilir.



KAYNAKLAR

- Abdul, R., Salwa, H., Novita, S., Ghazilla, R. A. R., Ramayah T., (2017). “The impact of sustainable manufacturing practices on sustainability performance”. *International Journal of Operations & Production Management* 37(2), 182-204. <https://doi:10.1108/IJOPM-04-2015-0223>.
- Gök, A., Dilşad, Kılıçtek, S., Gök ve Yakut, N. (2023) “Katmanlı imalat teknolojilerinin karşılaştırılmasına yönelik bir araştırma”. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, <https://doi:10.17714/gumusfenbil.1251130>.
- Akpınar, N., 2016. “Araçlardaki Bağlama Cıvatalarındaki Fonksiyon Kayıplarının İncelenmesi”. (Yüksek Lisans Tezi), Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Anonim. t.y. “Rapid prototypes move to metal components - EE Times”. Erişildi: 19.01.2025.
- Anonim. t.y.-a. “Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi “Eklemeli İmalat Yöntemleri İle Üretim ve Onarım Uygulamaları”. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/27453/289155>
- Anonim. t.y.-b. “Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi “Eklemeli İmalat Yöntemleri ile Üretim ve Onarım Uygulamaları”. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/27453/289155>
- Aslan, İ., ve Ahmet C., (2023). “Investigation Of Mechanical Properties Of Sand Casting Molds Produced By Binder Jetting 3d Printer”. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 7(2), 142-49. <https://doi:10.46519/ij3dptdi.1222613>.
- ASTM International. 2015. *ASTM A563, “Standard Specification for Carbon and Alloy Steel Nuts”*.
- Aydınlı, O. M. (2023) “Eklemeli İmalat Yönteminde Kullanılan Filament Katkılarının Üretilen Parçaların Mekanik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi”. (Yüksek Lisans Tezi), Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- Bacak, Selim. 2022. “ABS, PLA, TPU(FLEX) malzemelerden farklı parametreler kullanılarak üretilmiş numunelerin çekme dayanımı özelliklerinin incelenmesi”. *Süleyman Demirel Üniversitesi YEKARUM*, 7(2),58-64.
- Baş, H, Yapıcı, F., ve İnanç İ., 2022. “Yapışkan Püskürtme Yönteminde Üretim Parametrelerinin Önemi Ve Örnek Uygulama”. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 10(4), 1354-61, <https://doi:10.21923/jesd.1103808>.
- Başçı, Ü. G., ve Ymanoğlu, R., (2021) “Yeni Nesil Üretim Teknolojisi: Fdm İle Eklemeli İmalat”. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 5(2),339-52. <https://doi:10.46519/ij3dptdi.838281>.
- Başçı, Ü. G., ve Ymanoğlu R., (2022). “Havuz Fotopolimerizasyonu (HFP) ile Eklemeli İmalat”. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi* 10(2) ,914-28, <https://doi:10.29130/dubited.922415>.

- Bozkurt, Y., Gülsoy, H., ve Karayel, Y., (2021) “Eklemeli İmalat Teknolojilerinin Tıbbi Ekipmanların Üretiminde Kullanımı”. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, <https://doi:10.31202/ecjse.902023>.
- Can, E. S., Ayhan, E., Yurdakul, M., ve İç, Y. T., (2024). “FDM yöntemi ile üretilen eklemeli imalat parçaları için delik delme işlem parametrelerinin optimizasyonu”. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, <https://doi:10.17341/gazimmfd.1363157>.
- Cengiz, B., 2024. “3 Boyutlu Yazıcıda Karbon Fiber Filamentten Üretilen Farklı Dolgu Deseni ve Dolgu Yoğunluğuna Sahip Numunelerin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi”. (Yüksek Lisans Tezi) Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Isparta.
- Cojocar, V., Frunzaverde, D., Miclosina, C. ve Gabriela Marginean. 2022. “The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review”. *Polymers* 14(5):886, <https://doi:10.3390/polym14050886>.
- Crump, S. Scott. 1992. “Apparatus and Method for Creating Three-Dimensional Objects”.
- Çoban, Ö., Deniz, B.S., Ünlü, Celal Bayar Üniversitesi, ve HFT Tek Fak Turgutlu. (2016) “Kaynak Cıvata ve Somunlarının Çeşitleri, Üretimi, Yöntemi Ve Kullanım Alanları”. *Mühendis ve Makina* 57(678), 44-52.
- Dawoud, M., Iman, T., ve Samy J. E., 2016. “Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques”. *Journal of Manufacturing Processes* 21:39-45. <https://doi:10.1016/j.jmapro.2015.11.002>.
- Dedeakayoğulları, H., ve Kaçal, A., 2020. “Eklemeli İmalat Teknolojileri ve Kullanılan Talaşlı İmalat Yöntemleri Üzerine Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi”. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları* 1(1), 1-12.
- Dusanapudi, S., Krupakaran, R. L., Amaragonda Srinivas, Kathera Sai Nikhil, ve Tompala Vamshi. 2023. “Optimization and experimental analysis of mechanical properties and porosity on FDM based 3D printed ABS sample”. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi:10.1016/j.matpr.2023.10.096>.
- Efe, H.ve İmirzi. H. Ö., 2007. “Mobilya Üretiminde Kullanılan Çeşitli Bağlantı Elemanlarının Mekanik Davranış Özellikleri”. *Journal of Polytechnic* 10(1):93-103.
- Elmas, B. S., 2021. “Üç Boyutlu (3D) Yazıcıda Üretilen Polilaktik Asit (PLA) Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”. (Yüksek Lisans Tezi) , Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Erickson, E., Stevens, L., ve Markus Chmielus. 2023. “Binder Jetting”. Ss. 443-58.
- Gavas, M., Aydın, M., Mustafa Yasar, ve Yahya Altunpak. (2022) “Üretim yöntemleri ve imalat teknolojileri talassız imalat - talaşlı imalat- eklemeli imalat” C. 560. 5. bs. Ankara, Seckin Yayıncılık.
- German Institute for Standardization. (2011) “DIN EN ISO 10684, “Fasteners – Hot dip galvanized coatings”.
- Gibson, I., Rosen, D., ve Stucker, B., (2015) “Additive Manufacturing Technologies.” 2. bs. New York, NY: Springer New York.
- Gibson, I., Rozen, D.W., ve Stucker, B., (2010). “Additive Manufacturing Technologies.” Boston, MA: Springer US.
- Gökçe, H., (2020) “AL 5083 Alüminyum Malzemeye Vida Açma İşleminde Kılavuz Geometrisi Etkisinin İncelenmesi”. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 6(3),242-47.

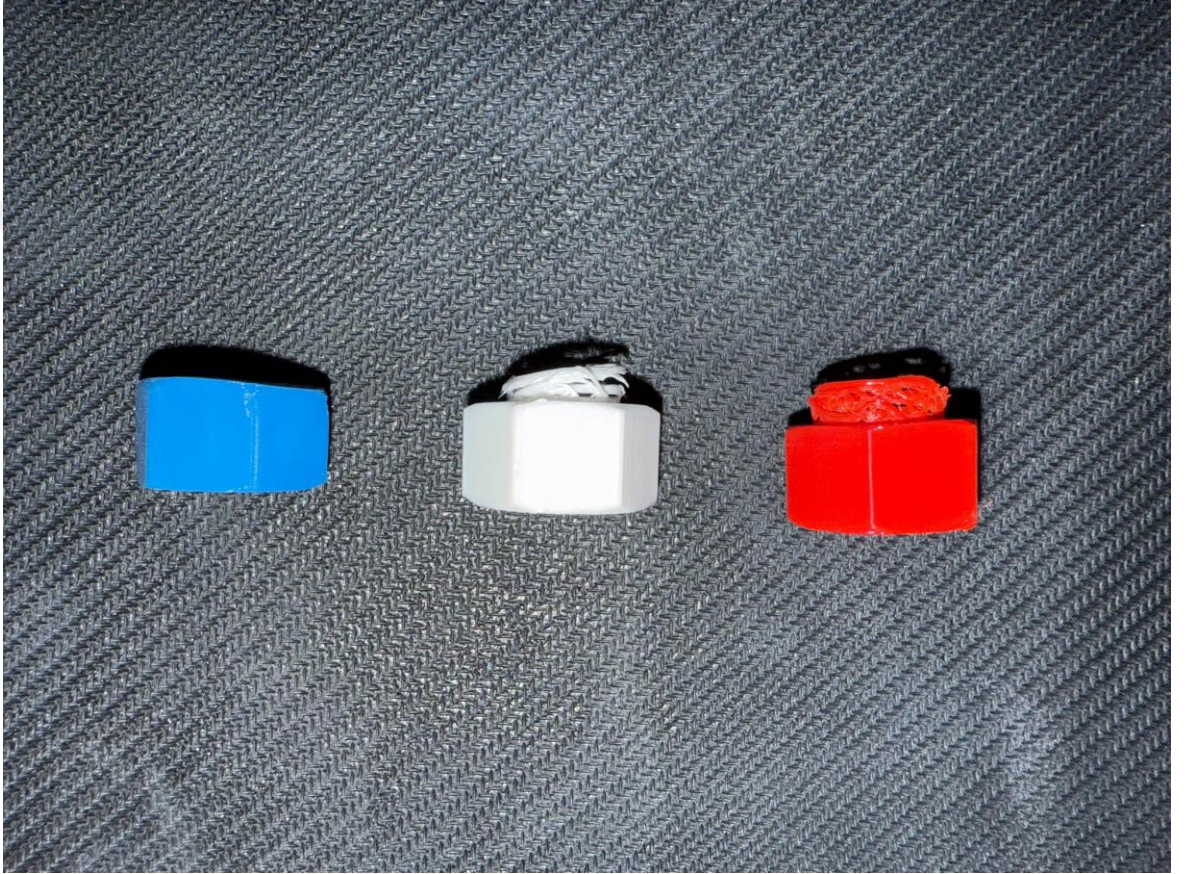
- Günay, M., Gündüz, S., Yılmaz, H., Yaşar, N., ve Kaçar, R., (2020) “PLA Esaslı Numunelerde Çekme Dayanımı İçin 3D Baskı İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu”. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 73-79, <https://doi:10.2339/politeknik.422795>
- Gürgen, M., Kayacan, M.C., (2020) “Bağlayıcı Püskürtmeli Metal Eklemeli İmalatta Kullanılan Parametreler”. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi* 3(1), 19-27.
- Haffner, M., Quinn, A., Hsieh, T., E. Bradley Strong, ve Toby Steele. (2018) “Optimization of 3D Print Material for the Recreation of Patient-Specific Temporal Bone Models”. *Annals of Otolaryngology, Rhinology & Laryngology* 127(5), 338-43, <https://doi:10.1177/0003489418764987>.
- Harshitha, V., ve Seeram Srinivasa Rao. (2019) “Design and analysis of ISO standard bolt and nut in FDM 3D printer using PLA and ABS materials”. *Materials Today: Proceedings* 19:583-88. <https://doi:10.1016/J.MATPR.2019.07.737>.
- Hornbeck, Larry J. (1993) “Multi-level digital micromirror device”.
- International Organization for Standardization. 2013. *ISO 898-1, “Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel,”*.
- Jayal, A. D., F. Badurdeen, O. W. Dillon, ve I. S. Jawahir. (2010) “Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2(3):144-52, <https://doi:10.1016/j.cirpj.2010.03.006>.
- Jiang, K., Liu, Z., Zhang, T., ve Wang, F., (2025) “Influence of bolt creep induced pre-tightening force relaxation on dynamic response of the bolted joint system”. *Journal of Sound and Vibration* 596:118800. <https://doi:10.1016/j.jsv.2024.118800>.
- Jimo, A., Braziotis, C., Rogers, H., ve Pawar, K., (2019) “Traditional vs Additive Manufacturing Supply Chain Configurations: A Comparative Case Study”. *Procedia Manufacturing* 39:765-74, <https://doi:10.1016/j.promfg.2020.01.432>.
- Kadir, A.Z.Y., Yusof, Y., ve Wahab, S., (2020) “Additive manufacturing cost estimation models—a classification review”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 107(9-10):4033-53. <https://doi:10.1007/s00170-020-05262-5>.
- Kaikai, X., Yadong, G., ve Zhao Qiang. 2023. “Comparison of traditional processing and additive manufacturing technologies in various performance aspects: a review”. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 23(3),188. <https://doi:10.1007/s43452-023-00699-3>.
- Kalpakistan, S., ve Schmid, S.R., (2017) “*Manufacturing Processes for Engineering Materials.*” C. 1085. 6. bs. Boston, Pearson Education.
- Karakılıç, U., Yalçın, B., ve Ergene, B., (2019). “Toz Yataklı/Beslemeli Eklemeli İmalatta Kullanılan Partiküllerin Uygunluk Araştırması ve Partikül İmalat Yöntemleri”. *Politeknik Dergisi* 22(4), 801-10. <https://doi:10.2339/POLITEKNİK.423707>.
- Kaveloğlu, S., Temiz Ş., Doğan, O. ve Kamer, M.S., 2022. “3 Boyutlu Yazıcı ile Üretilen Farklı Hücre Çaplarındaki Bal Peteği Sandviç Yapıların Eğme Dayanımlarının İncelenmesi”. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 37(2),459-70. <https://doi:10.21605/cukurovaumfd.1146410>.
- Kayır, Y., Güneş, S. ve Ercan Demirer. (2018) “Vidaların Açılmasında Kesici Uç Seçimi Yapan Bir Uzman Sistem”. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 4(3), 176-82.

- Kılıçaslan, Cenk, ve Umut İnce. (2017) "Tool life enhancement in cold bolt forging process: effect of forging stage design". *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 21(5):961-67. <https://doi:10.16984/SAUFENBILDER.286029>.
- Koçak, M. T., Bayraklılar, M.S., ve Ülker, O. "Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen ABS cıvata numunesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi". *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences* 27(1), 269-77.
- Kopar, M., ve Yıldız, A.S., (2023) "Experimental investigation of mechanical properties of PLA, ABS, and PETG 3-d printing materials using fused deposition modeling technique". *Materials Testing* 65(12):1795-1804. <https://doi:10.1515/mt-2023-0202>.
- Kukla, M., Sieracki, I., Maliga, W., ve Jan Górecki. (2022) "Compression Strength of PLA Bolts Produced via FDM". *Materials* 15(24):8740. <https://doi:10.3390/ma15248740>.
- Kutay, M. G., (2005) *Cıvatalar*. C. 375. 1. bs. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Li, M., Du, W., Elwany, A., Pei, X., ve Ma, C., (2020) "Metal Binder Jetting Additive Manufacturing: A Literature Review". *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 142(9). <https://doi:10.1115/1.4047430>.
- Masood, S. H. 2014. "Advances in additive manufacturing and toolings". *Comprehensive Materials Processing*, 529-51.
- Mikell P. G. (2021) *Modern İmalatın Prensipleri*. C. 1018. (4. Baskıdan çeviri).
- Miyanaçi, H. 2018. "Binder jetting additive manufacturing process fundamentals and the resultant influences on part quality." *University of Louisville*.
- Mustapha, K. B., ve Metwalli K. 2021. "A review of fused deposition modelling for 3D printing of smart polymeric materials and composites". *European Polymer Journal* 156:110591. <https://doi:10.1016/J.EURPOLYMJ.2021.110591>.
- Nurdin, M., ve Hâkim, A.L., 2015. "A Development of Flexible Manufacturing System using POLMAN T-100 Vise Casting Component as a Case Study". *Procedia Manufacturing* 2:77-81. <https://doi:10.1016/j.promfg.2015.07.013>.
- Özer, G. 2020. "Eklemeli Üretim Teknolojileri Üzerine Bir Derleme". *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. <https://doi:10.28948/ngumuh.626011>.
- Özmen, Ö., Sürmen, H. K., ve Sezgin. A. (2023). "3 Boyutlu Baskıda Dolgu Biçiminin Çekme Dayanımına Etkisi". *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 11(1):336-48. <https://doi:10.21923/jesd.1095594>.
- Park, S., Shou, W., Makatura, L., Matusik, W., ve Fu, K. (2022) "3D printing of polymer composites: Materials, processes, and applications". *Matter* 5(1):43-76. <https://doi:10.1016/J.MATT.2021.10.018>.
- Parupelli, S. K., ve Desai, A., (2019) "A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential". *American Journal of Applied Sciences* 16(8):244-72. <https://doi:10.3844/ajassp.2019.244.272>.
- Pick 3D Printer. t.y. "<https://pick3dprinter.com/slm-3d-printing/>". Erişildi: 15.01.2025.
- Prof. Dr. Şahin, Y. (2022). *Kompozit Malzemelere Giriş*. C. 4. baskı. 4. baskı. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Ranganathan, S., Sathish K. K., Gopal, S., ve Pradeep C. (2020) "The Effect of Print Orientation and Infill Density for 3D Printing on Mechanical and Tribological Properties".
- Saraçoğluyakup, T., Delibaş, H.Y. ve Özçelik, A. D. 2022. "A computational determination of a nozzle activated fixed-wing uav". *International Journal of 3D*

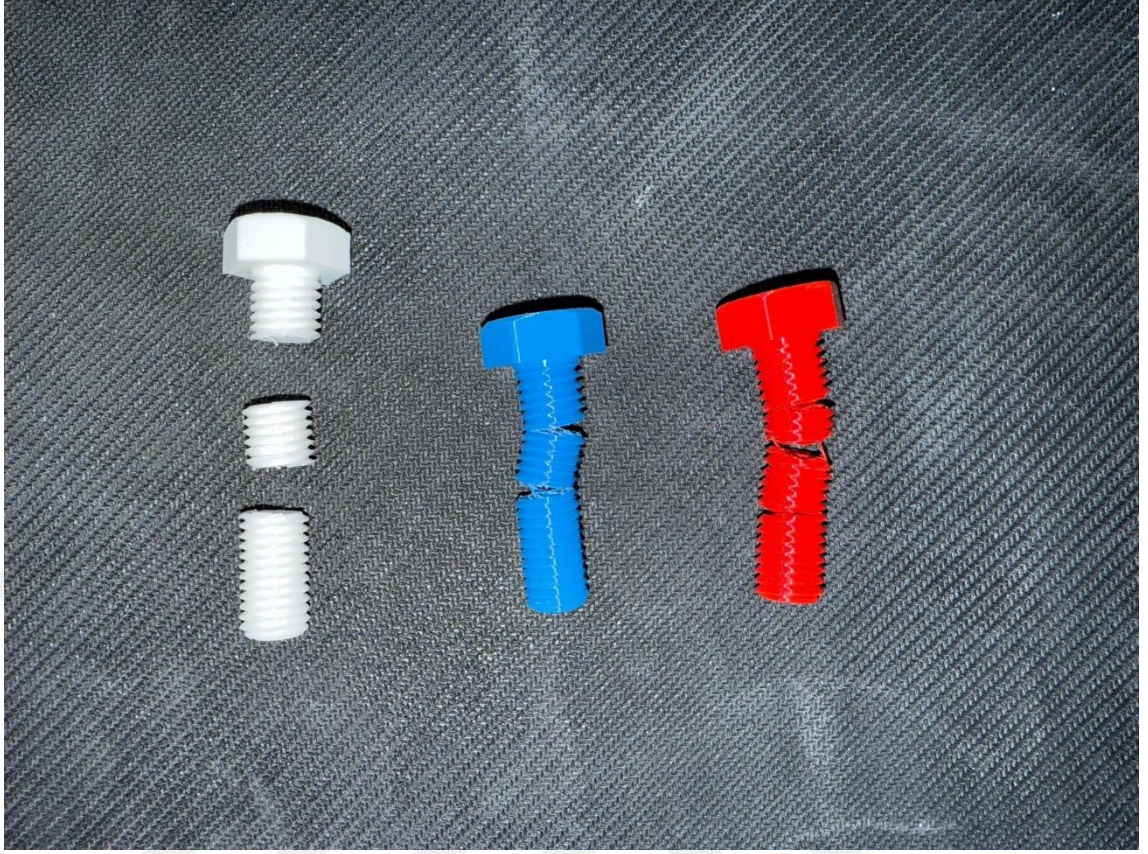
- Printing Technologies and Digital Industry* 6(2),292-306.
[https://doi:10.46519/ij3dptdi.1128158](https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1128158).
- Seçgin, Ö., (2021) “Effect of operational parameters on incremental forming of low-alloy sheet metals and its optimisation”. *Advances in Materials and Processing Technologies* 7(1),71-84. [https://doi:10.1080/2374068X.2020.1753449](https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1753449).
- Sedlak, J., Joska, Z., Jansky, J., Zouhar, J., Kolomy, S., Slany, M., Svasta, A., ve Jirousek, J. (2023) “Analysis of the Mechanical Properties of 3D-Printed Plastic Samples Subjected to Selected Degradation Effects”. *Materials* 16(8),3268. [https://doi:10.3390/ma16083268](https://doi.org/10.3390/ma16083268).
- Sönmez, S., Kesen, U., ve Dalgıç, C. (2018) “3 Boyutlu Yazıcılar”. Ss. 271-81 içinde *6th International Printing Technologies Symposium*. İstanbul: İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa.
- Subbarao, C. V. Y., Reddy, S., Inturi, V., ve Reddy, I. M., 2021. “Dynamic Mechanical Analysis of 3D Printed PETG Material”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1057(1),012031. [https://doi:10.1088/1757-899X/1057/1/012031](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1057/1/012031).
- Symes, M. D., Kitson, J. P., Yan, J., Richmond, C. J., Cooper, G. J. T., Bowman, R. W., Turlif V., ve Leroy C. (2012) “Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis”. *Nature Chemistry* 4(5),349-54. [https://doi:10.1038/nchem.1313](https://doi.org/10.1038/nchem.1313).
- Şahin, Y. (2022) *Kompozit Malzemelere Giriş Mukavemet- Hafiflik- Özgül Modül/Dayanım*. 4. bs.
- Tanaka, H., Kanahashi, K., Takekoshi, N., Mada, H., Ito, H., Shimoi, nY., Ohta, ve Takenobu, T., (2020) “Thermoelectric properties of a semicrystalline polymer doped beyond the insulator-to-metal transition by electrolyte gating”. *Science Advances* 6(7). [https://doi:10.1126/sciadv.aay8065](https://doi.org/10.1126/sciadv.aay8065).
- Udroiu, R., ve Braga, I. C., 2017. “Polyjet technology applications for rapid tooling”. *MATEC Web of Conferences* 112:03011. [https://doi:10.1051/mateconf/201711203011](https://doi.org/10.1051/mateconf/201711203011).
- Ulupınar, H., (2022) “Cıvatalarda Kuvvet Naklinin Cıvata Geometrisinde Yapılan Değişiklikler ile İyileştirilmesi ve Sonlu Elemanlar Metodu İle Analizi”. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Uslu, O. (2022). “Endüstri 1.0’dan Endüstri 4.0’a toplumsal yapının dönüşümü: schumpeterci”. (Yüksek Lisans Tezi), Başkent Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Ümit, Y., Başcı, G., ve Yamanoglu, R., (2021) “Yeni nesil üretim teknolojisi: FDM ile eklemeli imalat”. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry* 5(2):339-52. [https://doi:10.46519/IJ3DPTDI.838281](https://doi.org/10.46519/IJ3DPTDI.838281).
- Vyavahare, S., Teraiya, S., Panghal, D., ve Kumar, S. 2020. “Fused deposition modelling: a review”. *Rapid Prototyping Journal* 26(1):176-201. [https://doi:10.1108/RPJ-04-2019-0106](https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2019-0106).
- Wong, K. V., ve Hernandez. A., (2012) “A Review of Additive Manufacturing”. *ISRN Mechanical Engineering* 2012:1-10. [https://doi:10.5402/2012/208760](https://doi.org/10.5402/2012/208760).
- Yazıcıoğlu, O. ve Yazıcıoğlu, M. 2020. *Makine Elemanları Kavram – Uygulama – Tasarım*. C. 495. Seçkin Yayıncılık.

EKLER

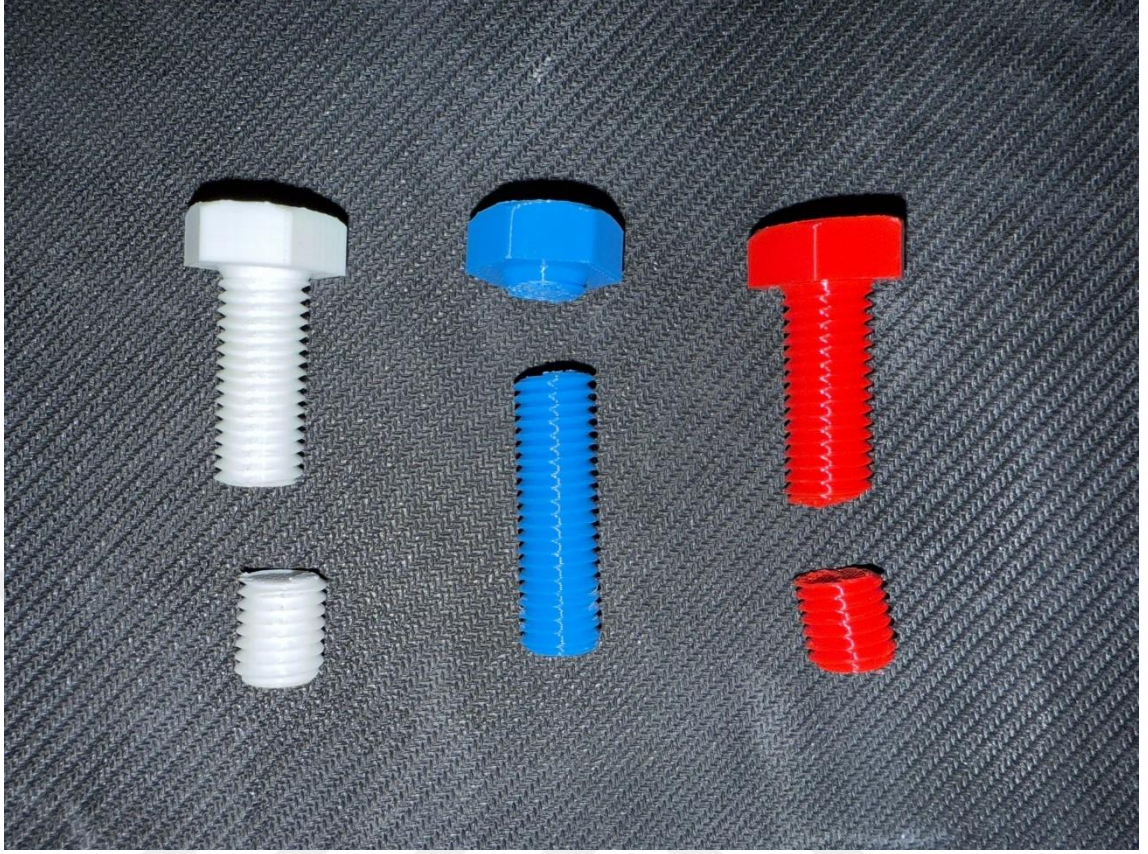
Ek A: Deney sonrası numune görünümleri



Şekil A.1: Somun diş dayanımı test sonucunda numunelerin görünümü.



Şekil A.2: Kayma gerilme dayanımı test sonucunda numunelerin görünümü.



Şekil A.3: Çekme gerilme dayanımı test sonucunda numunelerin görünümü.