T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATLI 3D DOKUMA KOMPOZİT YAPILARIN ÖZELLİKLERİ

KAZIM KEKİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KAHRAMANMARAŞ 2022

T.C.
KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇOK KATLI 3D DOKUMA KOMPOZİT YAPILARIN ÖZELLİKLERİ

KAZIM KEKİL

Bu tez,
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS
derecesi için hazırlanmıştır.

KAHRAMANMARAŞ 2022

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada, alıntı yapılan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Kazım KEKİL

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

Proje No: 2019/6-10 YLS

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÇOK KATLI 3D DOKUMA KOMPOZİT YAPILARIN ÖZELLİKLERİ (YÜKSEK LİSANS TEZİ)

KAZIM KEKİL

ÖZET

3D (üç boyutlu) dokuma kumaşlar kullanılarak geliştirilen tekstil yapısal kompozitler, özellikle havacılık ve savunma alanlarında kullanılmaktadır. 2D (iki boyutlu) dokuma kumaşlar, tekstil esaslı kompozitlerde en yaygın kullanılan takviye elemanlarıdır. 2D kumaşlardan üretilen kompozit yapıların, yüke maruz kalması durumunda delaminasyon esaslı bozunma göstermesi, yapısal bütünlüğünü kaybetmesine neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitler geliştirilmiştir. Çözgü ipliği olarak polipropilen, atkı ipliği olarak ise cam lifleri kullanılmıştır. Çok katlı 3D hibrid dokuma kumaşlar, bezayağı örgüsünde dört katlı olarak ve üç farklı bağlantı tipinde (2/1, 3/1, 5/1) üretilmiştir. Kompozit üretimi, epoksi reçine kullanılarak vakum infüzyon yöntemine göre yapılmıştır. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin mekanik özellikleri, darbe dayanımları ve darbe sonrası hasar toleransları, bağlantısız 2D dokuma kompozitler ile karşılaştırılmıştır. Eğme yüküne maruz kalan çok katlı 3D dokuma kompozitlerin delaminasyon esaslı bozunmasının, 2D dokuma kompozitlere kıyasla daha az olduğu belirlenmiştir. Düşük katlararası bağlantı sayısındaki çok katlı 3D dokuma kompozitlerin, bağlantısız 2D kompozit yapılara kıyasla darbe dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin, bağlantısız 2D dokuma kompozitlere kıyasla, darbe yükü altında daha düşük bozunma gösterdiği belirlenmiştir. Katlararası bağlantının, hasarın yapının bütününe yayılmasını engelleyerek sınırladığı, bu sayede yapı bütünlüğünün korunmasına katkı sağlayacak bir yöntem olarak geliştirilen çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin, havacılık ve savunma sanayine yönelik hasar toleranslı malzeme gereksinimine sahip kullanım alanları için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok katlı dokuma, 3D dokuma kompozit, Delaminasyon, Darbe dayanımı, Hasar toleransı

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Mayıs/2022

Danışman: Doç. Dr. Gaye KAYA

Sayfa Sayısı: 58

PROPERTIES OF MULTI-LAYER 3D WOVEN COMPOSITE STRUCTURES (MASTER THESIS)

KAZIM KEKİL

ABSTRACT

Textile structural composites developed by 3D (three-dimensional) woven fabrics are used especially in aerospace and defense areas. 2D (two-dimensional) woven fabric is the most commonly used reinforcement component in textile-based composites. The delamination-based damages of the composite structures produced by the use of multi-layered 2D woven fabrics leads to the loss of structural integrity. In this thesis study, multi-layer 3D hybrid woven composites were developed. Polypropylene was used as warp while the glass fibers were used as weft yarns. The multi-layer 3D hybrid woven fabrics were produced in plain weave as four layers in three different intersection types (2/1, 3/1, 5/1). The composites were manufactured using epoxy resin and vacuum infusion method. The mechanical properties, impact resistances and damage tolerances of multi-layer 3D woven composites were compared with 2D woven composites. The delamination-based damages of multi-layer 3D hybrid woven composites exposed to bending load was less than 2D woven composites. The multi-layer 3D woven composites with low interlayer connection number have higher impact strength compared to unconnected 2D composite structures. The multi-layer 3D woven composites show lower degradation under impact load compared to unconnected 2D woven composites. It has been concluded that the multi-layer 3D hybrid woven composites, developed as a method that will contribute to the preservation of structural integrity, are suitable for areas of use that require damage-tolerant materials for the aerospace and defense industries.

Keywords: Multi-layer weaving, 3D woven composites, Delamination, Impact resistance, Damage tolerance.

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Textile Engineering, May/2022

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Gaye KAYA
Page Numbers: 58

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında bilgi birikimini ve desteğini esirgemeyen Yüksek Lisans Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. Gaye KAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması kapsamında, çok katlı üç boyutlu kumaşların dokunması esnasında bilgi ve tecrübesini aktaran, Şehit İdare Ataşe Galip Özmen Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Dokuma Öğretmeni Ahmet Turan MUNDUZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın deneysel aşamasında yardımları ile katkı sağlayan Yüksek Lisans öğrencisi Tebernuş DİNÇER'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının deneysel çalışmalarında kullanılan "polipropilen iplik" tedarikini sağlayan Eruslu Tekstil'e teşekkür ederim.

Ve son olarak desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Kazım KEKİL

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Sayfa No

Sayfa No

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

2.5D : İki buçuk boyutlu

2D **:** İki boyutlu

3D **:** Üç boyutlu

ASTM **:** Amerikan Standartlar Kurumu

B **:** Numune eni

CT : Bilgisayarlı tomografi

D **:** Numune kalınlığı

D **:** Numunenin merkezindeki maksimum deformasyon

DIC **:** Dijital görüntü korelasyonu

E **:** Eğilme modülü

ε **:** Deformasyon

F **:** Lif yoğunluğu

g/m^2 **:** Kumaşın birim alan ağırlığı

ISO **:** International Organization for Standardization

L **:** Destek mesafesi

m : Yük-uzama eğrisinin eğimi

MHz : Mega herz

P **:** Yük

PP **:** Polipropilen

S **:** Eğme dayanımı

TS **:** Türk Standartları

UD **:** Tek yönde doğrultulanmış preform

VARTM **:** Vakum infüzyon

W **:** Kompozit ağırlığı

w **:** Lif ağırlığı

1. GİRİŞ

1.1. Çalışmanın Önemi

Hafif ve dayanıklı malzemeler olarak tanımlanan tekstil yapısal kompozitler, havacılık, uzay, otomotiv gibi birçok alanda kullanımı artan malzemeler haline gelmiştir (Hoa, 2009).

Tekstil yapısal kompozitlerde kullanılan preformların farklı tekniklerle üretilmesi mümkündür. İki boyutlu (2D) dokuma teknolojisi, spesifik uygulamalar için özelliklerin çeşitlendirilmesine imkan vermektedir. Mekanik özelliklerin, çözgü ve atkı yönündeki lif oranlarının değiştirilmesiyle modifiye edilmesi mümkündür. Diğer yandan, kumaş katmanlarının kompozit yapıdaki yerleşimi de birçok mekanik özelliğe etki etmektedir. Bu şekilde elde edilen dokuma kumaşların kompozit üretiminde kullanılmalarıyla ilgili literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur (Ullah et al. 2015, De Carvalho et al. 2012, Ishikawa ve Chou 1982, Naik ve Shembekar 1992, Whitcomb 1991).

2D dokuma kumaş, kompozit endüstrisinde en yaygın kullanılan materyaldir. 2D dokuma kumaş, çözgü (°0) ve atkı (90°) iplikleri olmak üzere iki iplik setinin birbirleriyle dik açıda kesişmeler yaparak oluşturdukları tekstil yüzeyidir. Temelde, bezayağı, dimi ve saten olmak üzere üç doku türünde, geleneksel dokuma makineleri ile üretilirler. 2D dokuma kumaş kullanılarak üretilen kompozitlerde, katlararasında bağlayıcı iplikler olmadığından dolayı delaminasyon eğilimi ortaya çıkmaktadır. 2D dokuma kompozitlerin özelliklerinin iyileştirilmesi için, üç boyutlu (3D) preformlar geliştirilmiştir (Bilisik, 2011).

Çok katlı dokuma yapılar, genellikle konvansiyonel 2D dokuma prosesinde birbirine dik iki iplik sisteminin (atkı ve çözgü) ek bir iplik sistemi ile üçüncü boyut z yönünde bağlanması ile ortaya çıkan yapılardır (Ünal, 2012). Düz tam kesişmeli 3D dokuma kumaş; çözgü, atkı ve Z-ipliği olmak üzere üç iplik setinden oluşmaktadır. Kumaş yapısını oluşturmak için, çözgü iplikleri atkı iplikleriyle, her bir katmanda, düzlemsel doğrultuda (in-plane), örgü tipine bağlı olarak kesişme yapmaktadır. Z-ipliği ise, yine örgü tipine bağlı olarak, her bir katmanda çözgü iplikleriyle, düzlem dışında (out-of-plane) kesişme yapar (Bilisik, 2011). Bu sayede, 3D dokuma kumaş kullanılarak üretilen kompozit yapılar, düzlem dışı yüklere karşı da dayanım sergilemekte ve özellikle darbe esaslı yüklemelerde hasar toleransının daha yüksek olduğu bilinmektedir.

Birden fazla lif çeşidini barındıran hibrit kompozitler, kompleks malzeme gereksinimlerini karşılaması bakımından son yıllarda önem kazanmıştır. Geometrisi ve bileşenlerine göre katmanlar-arası ve katman-içi hibrit kompozitler bulunmaktadır. Katmanlar-arası hibrit kompozitlerde, yapının her bir katmanının farklı olması söz konusuyken, katman-içi hibrit kompozitlerde ise, farklı lif türlerinin aynı katman içerisinde karıştırılması ifade edilmektedir. Özellikle yüksek performanslı cam ve karbon gibi liflerin aynı zamanda kırılgan olmaları, bu liflerden üretilen kompozitlerin hasar toleransını düşürmektedir. Termoplastik bazı liflerin, cam ve karbon lifleri ile hibritlenmesine dayanan kompozit yapıların kırılma tokluğunun arttığına yönelik çok sayıda çalışma mevcuttur (Shekar ve ark., 2010; Dehkordi ve ark., 2010; Sugie ve ark. 2009; Scida ve ark., 1997; Pandya ve ark., 2011; Zhang ve ark., 2012; Hosur ve ark., 2005).

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada, tekstil yapısal kompozitlerde kullanılmak üzere çok katlı 3D hibrit dokuma preformlar geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Çözgü ipliği olarak polipropilen, atkı ipliği olarak ise cam lifleri kullanılarak üretilecek preformlar, bezayağı örgüsünde dört katlı ve üç farklı bağlantı tipindedir (2/1, 3/1, 5/1). Çok katlı 3D hibrit dokuma preformlar, epoksi reçine kullanılarak vakum infüzyon yöntemi ile kompozit formuna dönüştürülecektir. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin mekanik özellikleri, darbe dayanımları ve darbe sonrası hasar toleransları bağlantısız 2D dokuma kompozitler ile karşılaştırılacaktır.

1.3. Çalışmanın Özgün Değeri

Bu tez çalışmasında geliştirilen çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitler; dokuma yapının kat sayısı ve bağlantı sayısı gibi konstrüksiyon özellikleri ile hammadde olarak kullanılan polipropilen ve cam lifinin hibritlenmesi ile ortaya çıkan yapısal özellikler bakımından özgündür. Bu tez çalışması ile, hem çok katlı 3D bağlantı sayesinde belirli kalınlıktaki kompozit yapının düzlem dışındaki dayanım özelliklerinin iyileştirilmesi, hem de hibritleme ile hasar toleransının arttırılması sağlanmış olacaktır.

1.4. 3D Preformların Üretim Yöntemleri

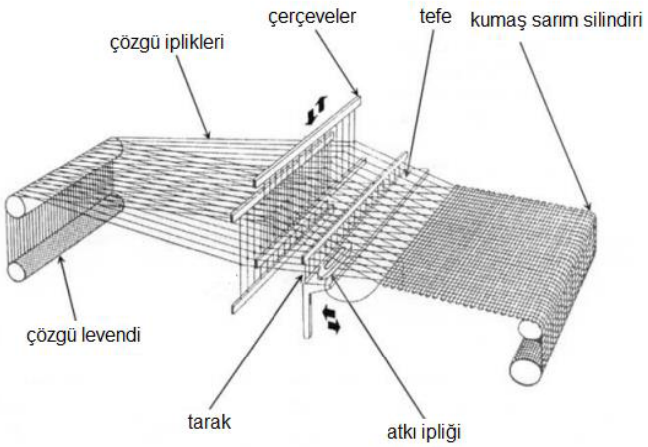
3D kompozitlerin kalınlıkları ve darbe performanslarında gösterdikleri üstünlüklerine rağmen, bu malzemelerin kullanımı henüz yaygın değildir. Bu sınırlı kullanımın başlıca

nedeni, preformları üretmek için kullanılan üretim süreçlerinin henüz belirli bir uygulama için bir preformu tasarlamak ve uygun maliyetli bir şekilde üretmek için yeterli düzeyde olmamasındandır. Kompozit yapılar için 3D preformların üretimi çeşitli yollarla gerçekleştirilebilir, ancak kompozit uygulamalar için geliştirilmiş tüm prosesler esasen; dokuma, örme, saç örgü ve dikiş prensibine dayanmaktadır (Tong ve ark., 2002).

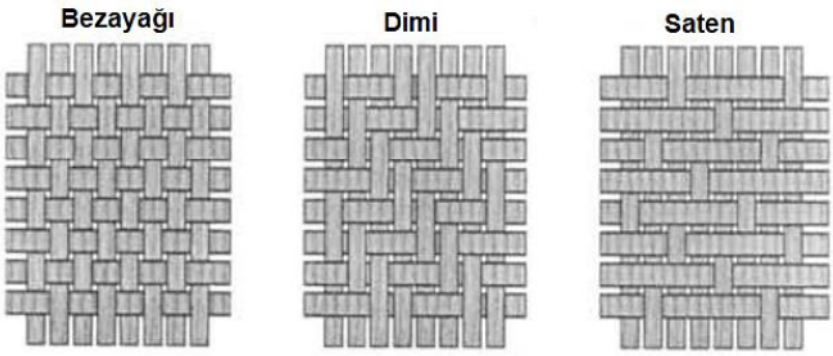
Dokuma, kompozit bileşenler için takviye malzemesi olarak kullanılan tek katmanlı kumaş yapılarıdır ve kompozit endüstrisinde en yaygın kullanılan preformdur. Bununla birlikte, aynı dokuma ekipmanının, 3D lif mimarisine sahip daha karmaşık, ağ şekilli preformlar üretmek için de kullanılması mümkündür.

1.4.1. 2D Geleneksel Dokuma

Dokuma, esasen çözgü ve atkı adı verilen iki iplik setinin bir araya getirilmesiyle oluşan kumaş türüdür. Temel dokuma işlemi Şekil 1.1'de, temel 2D dokuma desenleri ise Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Çözgü iplikleri makine yönünde, 0° yönünde ilerler ve bir iplik kaynağından dokuma tezgâhına beslenir. Üzerine gerekli miktarda çözgü ipliğinin önceden sarıldığı çözgü levendindeki çözgü iplikleri belirli bir gerginliktedir. Ağızlık açma mekanizmaları, tek tek ipliklerin seçilerek olarak kontrol edilmesini (jakarlı dokuma tezgâhı) veya bir dizi ipliğin aynı anda kontrol edilmesini sağlayabilmektedir. Burada, çözgü ve atkı ipliklerinin birbirine bağlanmasını ve dolayısıyla kumaşta oluşturulan deseni belirlemek önem arz etmektedir. Mekanik performans, dökümlülük ve lif miktarı gibi kumaş özelliklerinin çoğunu etkileyen kumaş desenidir. Bu nedenle, uygun bir 2D veya 3D preform üretmek ve bu üretim sürecini de nihai kompozit yapıdan beklenen performans özelliklerini karşılayabilecek lif mimarisini uygulamak çok önemlidir (Tong ve ark., 2002).



Şekil 1.1. Geleneksel dokuma işleminin gösterimi (Tong ve ark., 2002).



Şekil 1.2. Temel 2D dokuma desenleri (Tong ve ark., 2002).

Atkı atımı bir dizi yöntem kullanılarak yapılabilir. En eski tekniklerden biri, ipliğin mekikten çekilmesi ve mekik hareket ettikçe çözgü ipliklerinin üzerine serilmesidir. Nispeten yavaş bir tekniktir. Ancak kumaş atkısını oluşturan tek bir sürekli iplik olduğu için, kumaşta kapalı bir kenar oluşturma özelliğine sahiptir. Daha yeni, yüksek hızlı teknikler, kumaş eni boyunca ayrı atkı ipliklerinin serilmesini içerir. Bu atkı iplikleri, kanca ile mekanik olarak ağızlıktan çekilebilir veya yüksek basınçlı hava veya su ile itilebilir. Dokuma işleminde yer alan son mekanizma ise tefelemedir. Elde edilen kumaş, sadece 0° ve 90° ipliklerden oluşmaktadır ve geleneksel dokuma farklı açılarda iplik beslenmesine uygun bir yöntem değildir. Standart dokuma işlemi, büyük hacimli malzemelerin uygun maliyetli üretimi için idealdir. Bununla birlikte, aynı ekipmanı kullanarak, yukarıda açıklanan işlemin, katmanları birbirine bağlayan kalınlık yönünde ipliklere sahip olan daha karmaşık, çok katmanlı kumaşların üretilmesi için de kullanılması mümkündür (Tong ve ark., 2002).

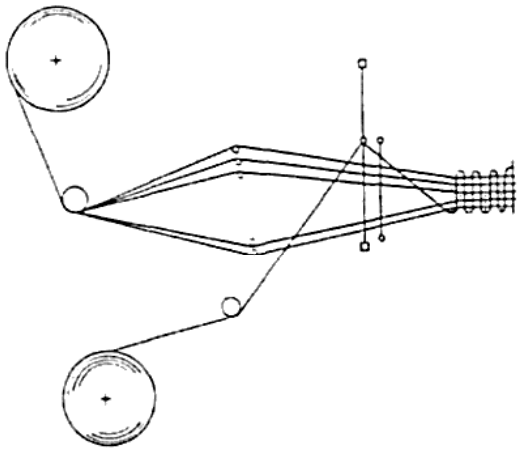
1.4.2. Çok Katlı 3D Dokuma

2D geleneksel dokuma ve çok katmanlı dokuma arasındaki ilk büyük fark, birden fazla çözgü ipliği katmanına sahip olma gerekliliğidir. Gereken katman sayısı (ve dolayısıyla preform kalınlığı) ne kadar fazlaysa veya üretilen kumaş ne kadar genişse, dokuma tezgâhına beslenmesi ve ağızlık açma işlemi sırasında kontrol edilmesi gereken daha fazla sayıda ayrı çözgü ipliği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, çok katmanlı dokuma için her bir çözgü ipliğinin bireysel olarak beslendiği büyük cağlıklar kullanılmaktadır. Bu da, zaman ve maliyet bakımından dezavantaj oluşturmaktadır. Dokunmakta olan kumaşın uzunluğu arttıkça, tekrar etmeyen bu maliyet daha az önemli hale gelir, ancak aynı malzemeden büyük hacimlerde dokuma yapmak, proses esnekliğini kısıtlamaktadır. Bu nedenle çoğu çok katmanlı dokuma, çözgü uç sayısının nispeten daha

az olduğu dar enli ürünler veya preform üretim maliyetinin kabul edilebilir olduğu yüksek katma değerli ürünler üretmek için kullanılmaktadır (Tong ve ark., 2002).

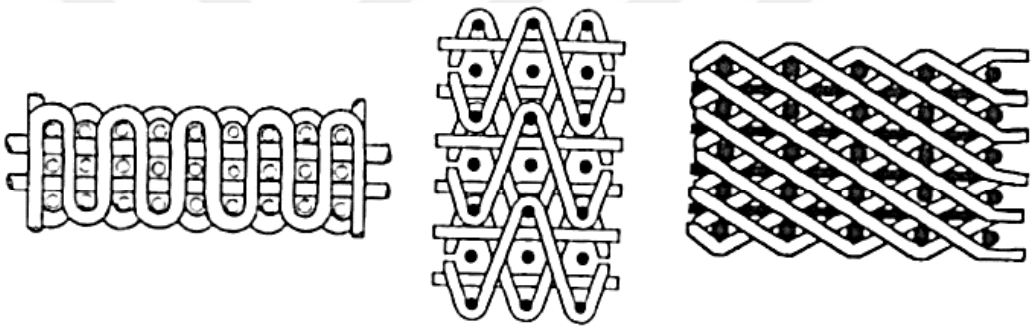
Çoğu 3D kompozit, yüksek performanslı ipliklerden (karbon, cam, seramik, vb.) üretildiğinden, standart ipliklerde kullanılan gerilim tertibatları uygun değildir ve dokuma sırasında tek tek iplikler üzerindeki gerilim kontrolü, tutarlı bir preform kalitesi elde etmede kritik öneme sahiptir. Bu genellikle, cağlık üzerindeki yaylı veya sürtünmeli gerilim tertibatlarıyla veya ağızlığa girmeden önce ipliklere küçük ağırlıklar asılarak gerçekleştirilir. Ağızlık açma mekanizmaları, geleneksel dokumada kullanılanla aynıdır, ancak ipliğin içinden geçtiği tarak dişleri, daha kırılgan yüksek performanslı liflerle sürtünmeyi en aza indirmek için tasarlanmıştır. Jakar mekanizmaları, bireysel çözgü iplikleri üzerindeki kontrolleri ve dokuma desenlerinde daha fazla esneklik sağladığından, daha sık kullanılma eğilimindedir. Atkı atımı, seçilen çözgü katmanları arasına tek tek atkıların eklenmesiyle genellikle bir kanca mekanizması ile gerçekleştirilir. Ağızlık açma ve atkı atımı mekanizmalarındaki varyasyonlar, çoklu ağızlıkların oluşturulmasına ve dolayısıyla aynı anda çoklu atkı atımına izin vermek için geliştirilmiştir ve daha hızlı bir preform üretim hızı da sağlamaktadır. Bu tür bir teknoloji genellikle gerçek 3D dokuma olarak kabul edilmektedir (Tong ve ark., 2002).

Lif mimarisinin üç boyutlu doğasının çok katmanlı dokumada üretilmesi, ağızlık açma modelinin tasarımı ile gerçekleşir. Genellikle çözgü ve atkı ipliklerinin büyük kısmı preformun içinde düz bir şekilde uzanacak ve böylece mekanik performansı en üst düzeye çıkaracak şekilde tasarlanır. Preformdaki katmanları birbirine bağlamak için, eğer çözgü leventleri kullanılıyorsa ayrı bir leventten gelen seçilmiş çözgü iplikleri, kalınlık yönünde hareket ederek bağlantıyı gerçekleştirecektir (Şekil 1.3) (Tong ve ark., 2002).



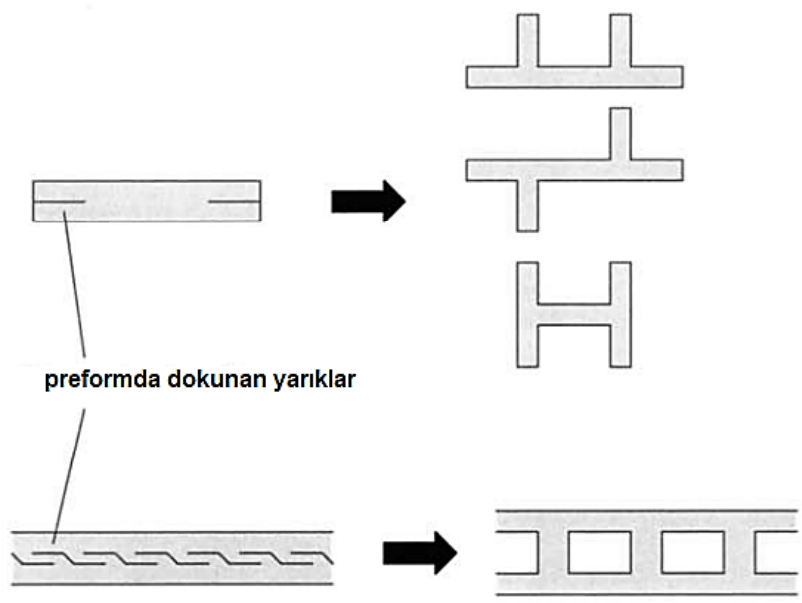
Şekil 1.3. Çok katlı dokumanın şematik gösterimi (Tong ve ark., 2002).

Böyle birçok katmanlı dokuma tezgâhı, Yamamoto ve ark. (1995) tarafından tarif edilmektedir. Hâlihazırda çok katmanlı dokuma kullanılarak üretilebilen bu tür preform örnekleri Şekil 1.4'te şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 1.4'teki çizimlerin idealleştirilmiş mimarileri gösterdiğine ve çoğu zaman bunların ortaya çıkan preform mimarisinden çok farklı olabileceğine dikkat edilmelidir (Bannister ve ark.,1998). İlk dokuma parametreleri (iplik boyutu ve büküm, iplik aralığı, katman sayısı, vb.) ile birlikte iplikler arasındaki gerilim ve sürtünme, nihai mimariyi ve dolayısıyla kompozit performansını etkileyebilir. Çok katmanlı dokumada bağlayıcı iplikler bir açıda yönlendirilebilse de, 2D geleneksel dokumada olduğu gibi yalnızca 0° ve 90° düz iplikli kumaşlar üretebilir. Bu durum, kayma ve burulma özelliklerini düşürebileceğinden, 3D dokuma preformların kullanımını sınırlamaktadır. Diğer bazı 3D dokuma teknikleri çok daha özel ekipman kullanımını gerektirse de, farklı açılarda ipliklerle preform üretmek mümkündür (Tong ve ark., 2002).

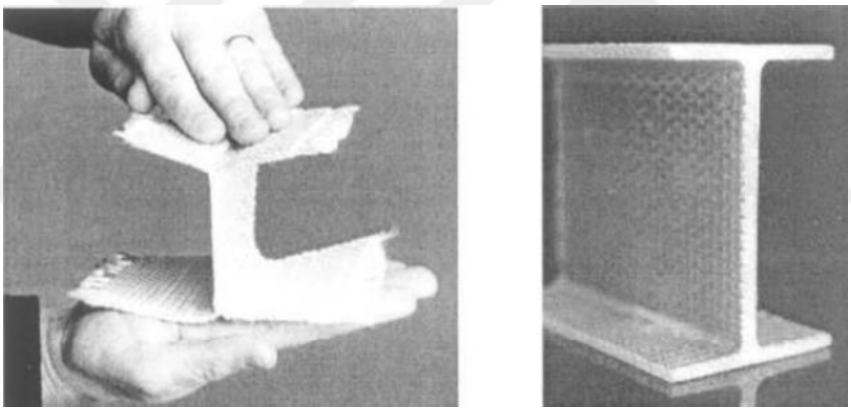


Şekil 1.4. Bazı çok katlı dokuma tiplerine örnekler (Tong ve ark., 2002).

Düz, çok katmanlı kumaşlar, standart tezgâhlarda dokunabilen tek yapı değildir. Çözgü ipliklerinin kaldırıldığı sırayı doğru bir şekilde programlayarak, karmaşık bir üç boyutlu yapı oluşturmak için açılabilen yarıkları olan bir kumaş dokumak da mümkündür. Bu yöntemle, I-kirişlerin ve kutu yapıların başlangıçta düz kumaştan nasıl oluşturulabileceğini gösteren şematik resim Şekil 1.5'te verilmiştir. Entegre olarak dokunmuş bir I-kiriş örneği ise Şekil 1.6'da gösterilmiştir. Ancak 3D dokumanın daha gelişmiş formları ile daha karmaşık preformlar üretmek mümkündür (Tong ve ark., 2002).



Şekil 1.5. Düz çok katmanlı ön kalıplardan şekillendirilmiş bileşenlerin üretimi (Tong ve ark., 2002).



Şekil 1.6. Düz çok katmanlı bir ön kalıptan kompozit I-kiriş oluşumu (Tong ve ark., 2002).

Çok katmanlı dokuma prosesi ile preform tasarımındaki bazı sınırlamalara rağmen, en büyük avantajı geleneksel dokuma tezgâhlarında gerçekleştirilebilmesi ve özel makineler geliştirmek için önemli maliyetler gerektirmemesidir. Temel olarak 0° ve 90° iplik mimarisine sahip büyük hacimli düz veya basit şekilli preformların üretimi için uygun görünmektedir (Tong ve ark., 2002). Çok katmanlı 3D dokuma tekniği ile üretilen bu yapıların, tam kesişmeli veya yarı kesişmeli olarak tasarımı mümkündür (Bilisik, 2011).

- Tam Kesişmeli Çok Katmanlı 3D Dokuma

Tam kesişmeli 3D dokuma kumaş; çözgü, atkı ve z-ipliği olmak üzere üç iplik setinden oluşmaktadır. Kumaş yapısını oluşturmak için, çözgü iplikleri atkı iplikleriyle, her bir katmanda, düzlemsel doğrultuda (in-plane), örgü tipine bağlı olarak kesişme yapar. Z-

ipliği ise, yine örgü tipine bağlı olarak, her bir katmanda çözgü iplikleriyle, düzlem dışında (out-of-plane) kesişme yapar (Bilisik, 2011).

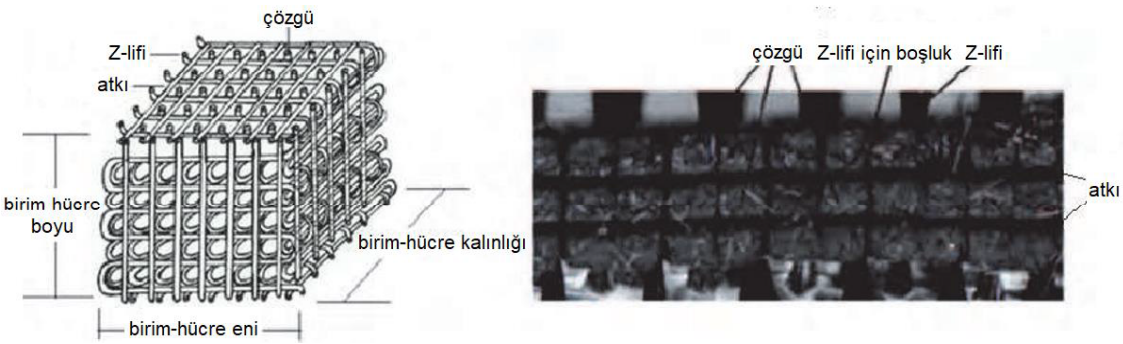
- Yarı Kesişmeli Çok Katmanlı 3D Dokuma

Yarı-kesişmeli 3D dokuma kumaşta; çözgü ve atkı iplikleri, her bir katmanda, düzlemsel doğrultuda (in-plane), örgü tipine bağlı olarak birbirleriyle kesişme yaparken, z-iplikleri herhangi bir kesişme yapmaksızın çözgü katmanları arasında dik olarak yatmaktadır (Bilisik, 2011).

1.4.3. 3D Ortogonal Dokuma

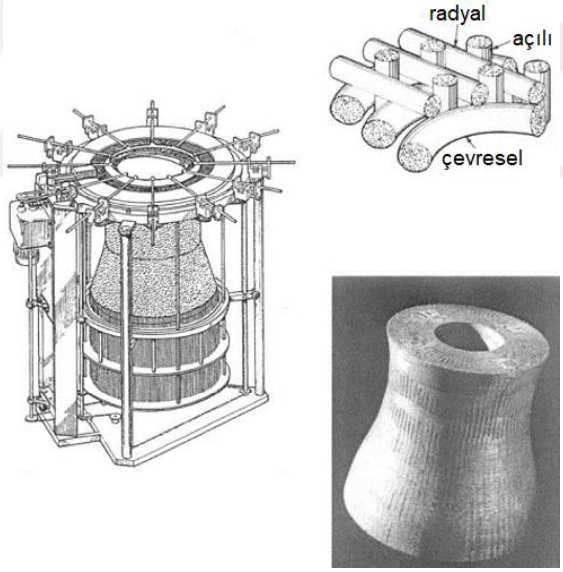
Çok katmanlı 3D dokuma ve 3D ortogonal dokuma kumaşlar arasındaki ayrım literatürde net olarak verilmemiştir. Ancak, dokumanın geleneksel tanımında, ipliklerin birbiriyle kesişim yapması gerekmektedir. Bu nedenle, kesişmesiz lif mimarisine dayanan 3D ortogonal tekniği dokusuz kumaşlar olarak da tanımlanmaktadır (Khokar, 1996). Bu işlemler, çözgü ipliklerinden (X yönü) ayrı olan çok sayıda ipliğin, Y ve Z yönlerine oldukça kontrollü bir şekilde sokulması bakımından genellikle çok katmanlı dokumadan farklıdır. Bir 3D ortagonal dokumada üretilen yapı, yalnızca çözgü ipliklerinin oluşturduğu ağızlık açma sıralamasına dayanmaz. Bu nedenle, üretimde kullanılan ekipmandan ziyade üretilen preformu tanımlamak daha iyi olacaktır (Tong ve ark., 2002).

3D ortogonal dokuma kumaşlar, çözgü, atkı ve Z-ipliği olmak üzere üç iplik setinden meydana gelir. Çözgü iplikleri yatay, diğer iplikler dikey olmak üzere, bu kumaş yapısının elde edilebilmesi için tüm iplik setleri kesişme yapar. Atkı iplikleri, çözgü ipliklerinin arasına beslenir ve Z-iplikleri bu iki iplik setini bağlayarak yapısal bütünlüğü sağlar. Şekil 1.7'de, Bilisik (2009) tarafından geliştirilen 3D ortogonal dokumanın birim hücre şematik görünümü ve karbon preform örneği verilmiştir.



Şekil 1.7. 3D ortogonal dokuma şematik gösterim ve karbon preform (Bilisik, 2009).

1970'lerden bu yana, 3D ortogonal preformlar üretmek için çok çeşitli işlemler geliştirilmiştir. Bunlar, nispeten geleneksel dokuma mekanizmalarını kullanan ancak çoklu atkı eklemeli tekniklerden (Mohamed ve ark., 1988), geleneksel dokuma işlemiyle çok az ortak noktası olan işlemlere (Mohamed ve ark., 1988; Ko, 1989) kadar değişmektedir. Her iki işlem de, etrafına radyal ve çevresel ipliklerin (silindirik preformlar için) veya Y ve Z ipliklerin (dikdörtgen preformlar için) yerleştirildiği bir başlangıç çerçevesi kullanmaları bakımından benzerdir. Autoweave™ için bu çerçeve, bir fenolik köpük mandrel içine yerleştirilmiş önceden kürlenmiş takviyelerden oluşurken, Aerospatiale™ yönteminde, eksenel ipliklerin yerleştirilmesi sırasında çıkarılan metalik çubuklar ve plakalardan oluşmaktadır (Şekil 1.8). Her iki işlem de ilk çerçevenin uygun biçimde şekillendirilmesiyle preformlar üretebilir ve çok boyutlu preformları, yani X, Y veya Z'den farklı yönlerde yerleştirilen lifleri içeren mimarileri oluşturmak için kullanılabilir. Bu iki işlem çoğunlukla roket motorlarında ve çıkış konilerinde bileşen olarak kullanılmak üzere karbon-karbon kompozitlerin üretiminde kullanılmaktadır (Tong ve ark., 2002).

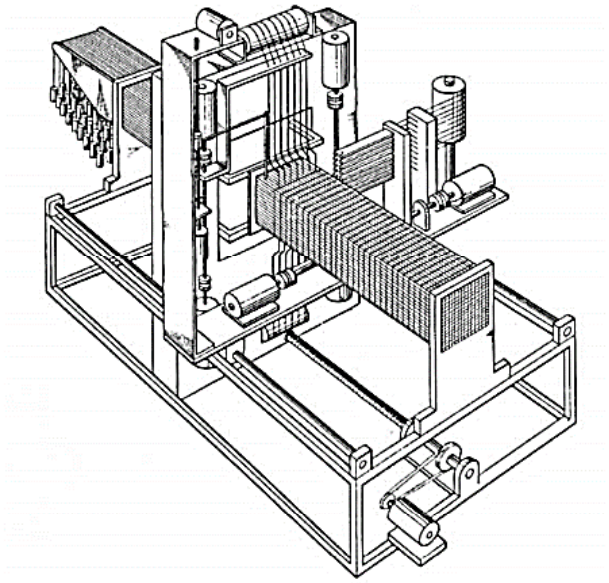


Şekil 1.8. 3D ortogonal dokuma preformlar üretmek için Aerospatiale™ yönteminin gösterimi ve preform örneği (Tong ve ark., 2002).

Japonya'da, yine 1970'lerden bu yana, özellikle Three-D Composites Research Corporation'da (Mitsubishi Electric Corporation'ın bir yan kuruluşu) 3D ortagonal dokuma preform üretimi için kullanılan makinelerde önemli geliştirmeler gerçekleştirilmiştir. Preformların üretimi için yöntemler Fukuta ve ark. (1974) ve Kimbara ve ark. (1991) tarafından geliştirilmiştir (Şekil 1.9). Yine bu işlemler, önceden belirlenmiş

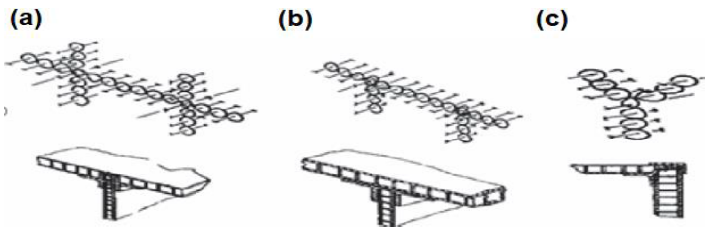
yönler boyunca iplik veya kürlenmiş kompozit çubukların yerleştirilmesine dayanır. Diğer yöntemlerle temel fark, bu yerleştirmeyi kontrol eden mekanizmalardır.

Çok eksenli dokumadan farklı olarak, ortogonal dokuma geleneksel dokuma teknolojisini kullananlardan genellikle daha yavaş bir üretim yöntemi olmasına rağmen, idealleştirilmiş görünüme yakın lif mimarileri üretme konusunda daha elverişlidir. Burada açıklanan işlemler, genellikle çok katmanlı dokuma yoluyla üretilenlerden daha karmaşık olan çok çeşitli preformlar üretebilse de, bu yöntemlerin ticari kullanımı son derece sınırlıdır. Geliştirilen ekipmanın çoğu son derece spesifiktir ve genellikle büyük hacimli üretim için uygun değildir. Bu nedenle ticari kullanımı, daha çok pahalı karbon-karbon veya seramik kompozit yapıların üretiminde olmuştur (Tong ve ark., 2002).



Şekil 1.9. 3D ortogonal dokuma preformların üretimi için makine (Fukuta ve ark., 1974).

3D ortogonal dokuma, modifiye edilmiş dokuma tezgâhları kullanılarak, bazı yapısal parçaların üretimi için, T ve I gibi çeşitli şekillerde üretilebilir. Şekil 1.10'da, çeşitli şekillerde üretilen 3D ortogonal dokuma preformların şematik görüntüsü verilmiştir (Abildskow, 1996).

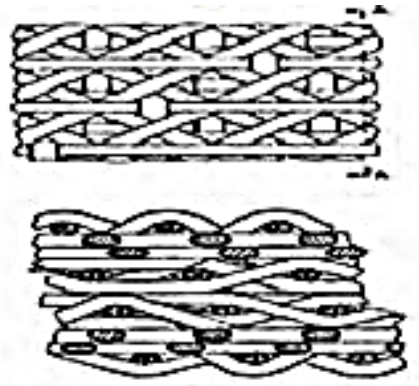


Şekil 1.10. Çeşitli şekillerde üretilen 3D ortogonal dokuma preformların şematik görüntüsü a; H-biçimli, b; TT-biçimli, c; Y-biçimli (Abildskow, 1996).

1.4.4. Çok Eksenli Dokuma

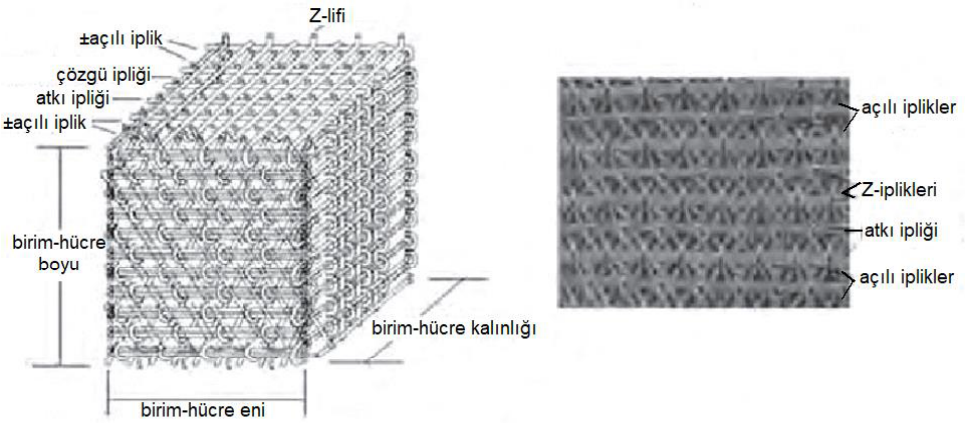
Çok katmanlı dokuma kumaşların kullanımının karşılaştığı ana sorunlardan biri, preform düzleminde ±45° yönlendirilmiş lifler içeren bir kumaş üretmenin zorluğudur. Çok katmanlı kumaş üretebilen standart endüstri tezgâhları bu kumaşı üretemez. Bağlayıcı iplikleri ±45° gibi açılarda yönlendirmek mümkündür ancak bu, kompozitin düzlem içi, eksen dışı özelliklerini önemli ölçüde etkilemeyecektir. Bazı ortogonal preformlar bu tip lif mimarileriyle üretilebilse de, bunların üretiminde kullanılan ekipman ve işlemler genellikle büyük hacimli üretim için uygun değildir. Bu durum, ±45° lif ekleme gerekliliği nedeniyle çok katmanlı kumaş kullanılarak yapılabilecek potansiyel bileşenleri sınırlandırır. Çünkü, kalınlık yönünde lifler içeren tek, bütünsel olarak dokunmuş bir preformun kullanılmasıyla elde edilebilecek üstünlükleri de genellikle ortadan kaldırır. Bu nedenle, yeni makinelerdeki gelişmeler çok eksenli ipliklerle preformların üretilmesine yönelik olmuştur. Curiskis ve ark. (1997), çok eksenli preformlar üretmek için kullanılan teknikleri gözden geçirmiş ve tanımlamıştır. Üç eksenli dokuma, lappet dokuma ve bölünmüş tarak sistemleri gibi işlemler, birçok araştırmacı tarafından çok eksenli, çok katmanlı preformlar üretebilen ekipman geliştirmek için kullanılmış ve bu ekipmanın geliştirilmesine ilişkin bir dizi patent başvurusu yapılmıştır (Ruzand ve Guenot, 1994; Farley, 1993; Anahara ve ark., 1991; Addis, 1996; Mohamed ve Bilisik, 1995). Umut verici sonuçlar gösterilmiş olmasına rağmen, mevcut rapor edilen teknolojinin hala geliştirme aşamasında olduğu görülmektedir ve preformlar, ±45° ipliklerin preform kalınlığında diğer seviyelerde değil, yalnızca dış yüzeylere doğru olmasıyla sınırlı görünmektedir.

Ruzand ve Guenot'ın (1994) geliştirdikleri çok eksenli 3D dokuma preform, ±çapraz, çözgü ve atkı olmak üzere dört iplik setinden meydana gelmektedir. Çapraz iplikler, iki karşıt katmanda, kumaşın üst ve alt yüzeyinde kumaş enini doldurarak serilirler. Seçili atkı ipliklerinin, çözgü iplikleriyle, yapının her iki yüzeyinde de bağlantı yapmaları neticesinde, çapraz iplikler konumunu korumuş olurlar. Şekil 1.11'de, Ruzand ve Guenot'ın (1994) çok eksenli 3D dokuma preform görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.11. Çok eksenli 3D dokuma kumaş (Ruzand ve Guenot, 1994).

Mohamed ve Bilisik'in (1995) geliştirdikleri çok eksenli 3D dokuma kumaş ise, ±çapraz, çözgü, atkı ve Z-ipliği olmak üzere beş iplik setinden meydana gelmektedir. Çok sayıda çözgü ipliğinin yapının ortasına konumlandırılması mümkündür. Burada, ±çapraz iplikler, yapının arka ve ön yüzünde konumlanırlar ve diğer iplik setleri (çözgü ve atkı), Z-iplikleri tarafından kilitlenirler. Bu tip preformlar, nihai kompozitlerin düzlemsel özelliklerini iyileştirmektedir. Şekil 1.12'de, birim hücrenin şematik ve karbon preform görüntüsü verilmiştir.



Şekil 1.12. Çok eksenli 3D dokuma birim hücre şematik karbon preform görüntüsü (Mohamed ve Bilisik, 1995).

1.4.5. Spacer Dokuma

Dokuma esaslı preform teknolojilerinde kullanılan bir diğer yöntem ise, spacer dokumadır. Bu preformlar, kadife dokuma olarak da bilinen geleneksel tekstil tekniği kullanılarak üretilir. Bu çok katmanlı dokuma işleminde, sabit bir mesafe ile aralıklı iki takım çözgü ipliği ayrı kumaşlar olarak dokunur, ancak aynı zamanda belirli çözgü ipliklerinin bir kumaş tabakasından diğerine transferi ile birbirine bağlanır. Hav iplikleri

olarak bilinen bu çözgü iplikleri, her bir yüz kumaşına dokunur, böylece iki yüz arasında güçlü bir bağlantının meydana geldiği bir sandviç yapı oluşturur. Yüzey kumaşları arasındaki boşluk, dokuma tezgâhındaki çözgü ipliklerinin ayrılmasını kontrol ederek ayarlanabilir ve hav ipliklerinin açısı dikeyden (90°) çapraz açılara (örneğin ±45°) değişebilir. Ancak, açılar sadece çözgü yönünde üretilebilir. Spacer dokuma preformlar ticari olarak üretilebilmektedir ve yaklaşık 23 mm kalınlığa kadar olan tipleri mevcuttur. Yüz kumaşları arasındaki güçlü bağlantı nedeniyle, soyulmaya ve delaminasyona dayanıklı sandviç yapıların üretimi için uygundur (Bannister ve ark., 1999).

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

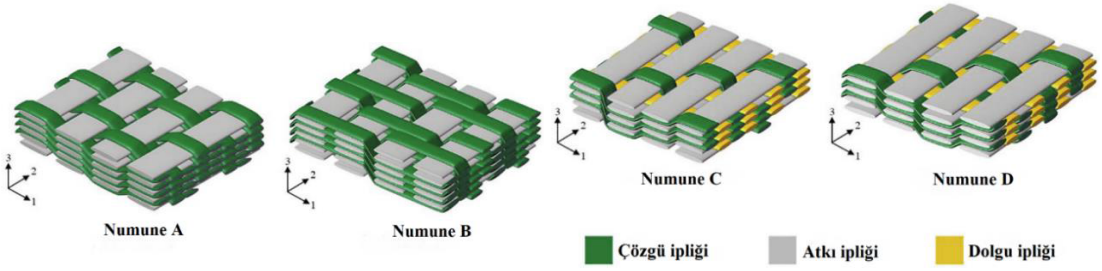
3D dokuma kompozit yapılar ile ilgili literatürde karşılaşılan bazı çalışmalar özetlenmiştir:

Dahale ve ark. (2019), atkı sıklığının 3D dokuma kompozit yapıların çekme, basma, kayma ve darbe özelliklerine etkisini inceleyen çalışmalarında; 4 ve 14 tel/cm atkı sıklığına sahip 3D dokuma kumaşlar geliştirmiştir. Daha yüksek atkı sıklığına sahip yapıların, kompakt bir davranış sergilediği ifade edilmiştir. Lif miktarı arttıkça, daha yüksek çekme ve basma dayanımı elde edilmiştir.

Stig ve Hallström (2013), karbon liflerden oluşan 3D dokuma kompozitlerin elastik modülünü incelemek için üç farklı analitik model geliştirmiştir. Elde edilen sonuçlarda, krimp oranının kompozit yapıların mekanik özelliklerine önemli bir etkisinin olduğu ifade edilmiştir.

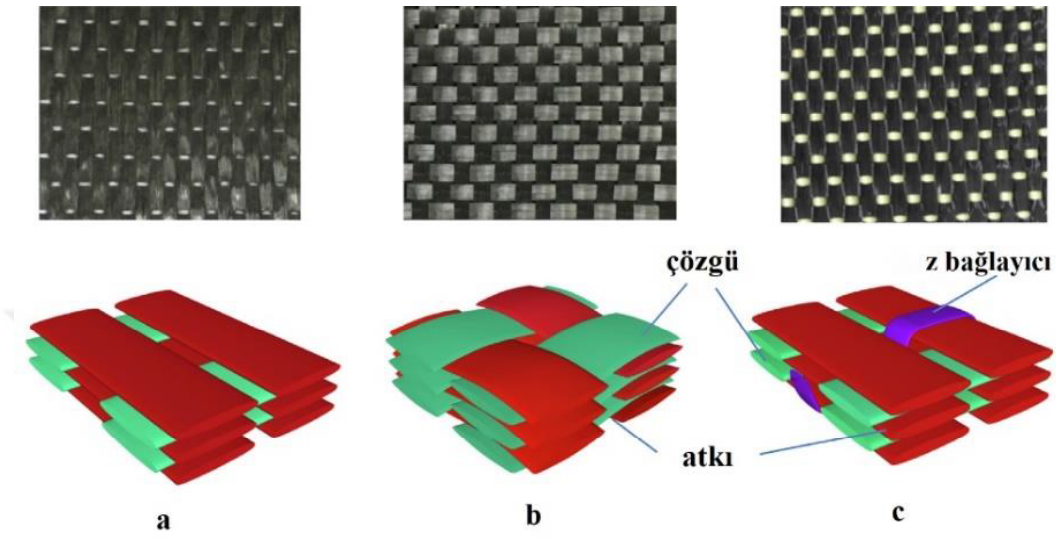
Hang ve ark. (2021) 2.5D dokuma kompozitlerin atkı ve çözgü yönünde meydana gelen deformasyonlarını modellemek için bir hasar analizi çalışması yapmıştır. Krimp oranı arttıkça, dokuma kompozitlerin atkı yönündeki dayanım ve modülünün önemli ölçüde azaldığı ifade edilmiştir.

Jiao ve ark. (2020), farklı yapılardaki 3D dokuma kompozitlerin geometrik varyasyonlarının (Şekil 2.1) mekanik özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen kapsamlı bir deneysel çalışma yapmıştır. Bu kompozitlerden ikisi atkı ve çözgü ipliğinden oluşurken, ikisinde fazladan dolgu ipliği ilave edilmiştir. Kompozitlerin hem çekme hem de basma özelliklerinin, yük taşıyıcı ipliklerin krimpinden etkilendiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca dolgu ipliklerinin eklenmesinin, çözgü yönü performansını önemli ölçüde iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.



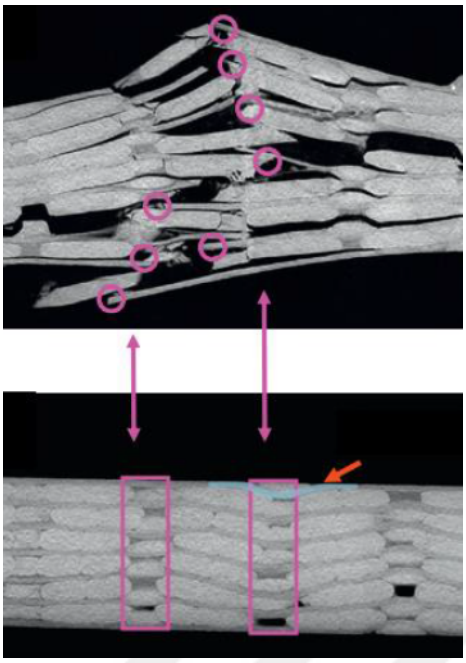
Şekil 2.1. Farklı dokuma yapısına sahip 3D kompozitlerin şematik gösterimi (Jiao ve ark. 2020).

Miao ve ark. (2019), kumaş yapısının düşük hız darbe dayanımı üzerindeki etkisini karakterize etmiştir. Bu amaçla, katmanlı tek yönlü ve çok katlı 3D dokuma ve 3D ortogonal dokuma yapılar (Şekil 2.2) ile takviye edilen kompozitler üretilmiştir. Darbe testi sonucunda 3D ortogonal kompozitin, darbeye bağlı deformasyon ve enerji absorpsiyonu bakımından daha iyi bir darbe direnci sergilediği ortaya çıkmıştır.



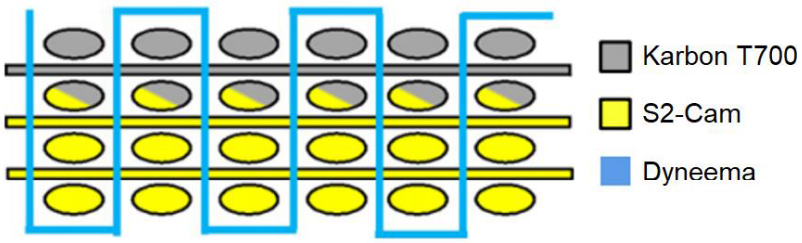
Şekil 2.2. Kumaş yapısı (a) Katmanlı tek yönlü kumaş, (b) Katmanlı dokuma kumaş, (c) 3D ortogonal dokuma kumaş (Miao ve ark. 2019).

Mahadik ve Hallett (2011), iplik krimpinin, basma esaslı yüklemelerde açılı-interlok bir 3D dokuma kompozitin mekanik özellikleri ve kırılma mekanizmaları üzerindeki etkisini araştırmıştır. 3D dokuma kumaşlar, yapının kalınlığı boyunca takviye lifi içerdiğinden, hasarın bastırılmasına yardımcı olan ve çatlak yayılmasını geciktiren katmanlar arası özellikler sergilemektedir. Bununla birlikte, iplikte meydana gelen krimp, özellikle basma kırılma mekanizmalarının, yük taşıyan iplikler yönünde bulunan yüksek kıvrımlı bölgelere bağlı olduğu gösterilmiştir. İplik kesişmelerinin olduğu yani krimpin yüksek olduğu bölgeler, yapının yüke maruz kalması durumunda kırılma bölgeleri olarak ortaya çıkmıştır (Şekil 2.3). İplik krimpinin en aza indirilmesiyle birlikte, 3D dokuma kompozitlerin performansını en üst düzeye çıkarmanın mümkün olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 2.3. İplik krimpine bağlı kırılma bölgeleri (Mahadik ve Hallett, 2011).

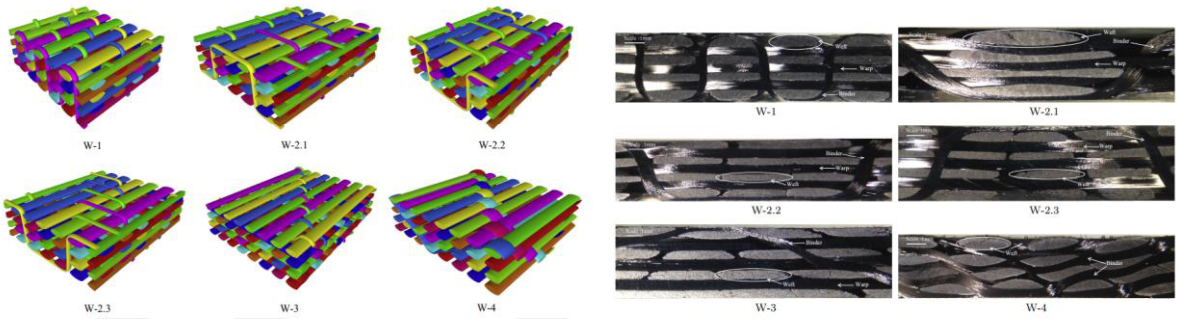
Seltzer ve ark. (2013), S2 cam, karbon ve her ikisinin bir hibrit kombinasyonu ile takviye edilmiş ve polietilen veya karbon Z-iplikleri içeren 3D ortogonal dokuma kompozitlerin (Şekil 2.4), düşük hız darbe özelliklerini incelemişlerdir. Bunun için üç farklı 3D ortogonal dokuma kompozit üretilmiştir. Farklı darbe enerjileri (21-316 J aralığında) kullanarak, darbe dayanımı ve absorplanan enerjileri 2D kompozitlerle karşılaştırmışlardır. Hem 2D hem de 3D kompozitlerdeki darbe dayanımının, esas olarak düzlemsel (in-plane) lif kırılmasına bağlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca 3D kompozitlerin, yapısal özelliklerine (elyaf tipi, sıklık, gözeneklilik, vb.) bakılmaksızın 2D kompozitlere göre iki kat daha fazla enerjiyi absorpladıkları ve Z-ipliklerinin kompozitlerin yapısal bütünlüğünü koruduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 2.4. 3D ortogonal hibrit kompozitin şematik görüntüsü (Seltzer ve ark. 2013).

Dai ve ark. (2015), doku mimarisi ve bağlayıcı iplik yerleşiminin, 3D dokuma kompozitlerin mekanik davranışı üzerindeki etkisini araştıran kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Bunun için; dar dokuma tezgâhı kullanılarak karbon lifi takviyeli altı farklı tipte

yapı üretilmiştir (W-1: 1/1 ortogonal, W-2.1, W-2.2, W-2.3: 3/3 ortogonal, W-3, W-4: açılı interlok) (Şekil 2.5). 3D dokuma kompozitlerin mekanik özelliklerinin, doku mimarileri ile belirlenen reçine yoğun bölgelerin dağılımı ve yük taşıyıcı liflerin krimpinden etkilendiği ifade edilmiştir. Ayrıca reçine yoğun bölgelerdeki bağlanma noktalarının tüm örgü tiplerinde hasar başlatma yerleri olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.5. 3D dokuma yapıların görüntüleri (Dai ve ark., 2015).

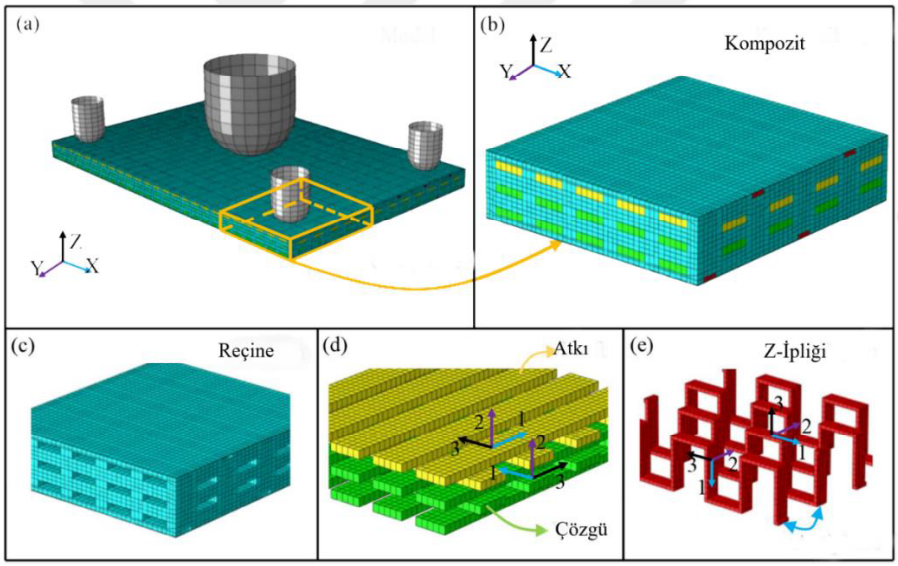
Ansar ve ark. (2011), 3D dokuma kompozitlerin modelleme tekniklerini, mikro geometri, mekanik/termo mekanik davranışı dikkate alarak sistematik olarak inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışmada 3D dokuma kompozitlerin avantajları, dezavantajları ve uygulamaları da açıklanmıştır. Ayrıca çalışma 3D dokuma kompozitlerin mikro geometrisini, mekanik davranışını ve darbe davranışını modelleme tekniklerinde yapılan gelişmelere genel bir bakış sunulmuştur.

Hallal ve ark. (2012) 2.5D interlok dokuma kumaş kompozitinin elastik özelliklerini tahmin etmek için geliştirilmiş bir analitik model çalışması yapmışlardır. Önerilen analitik modelin temel amacı, dokuma kompozitlerde, özellikle açılı-interlok yapıda, deneysel olarak elde edilen verilerle karşılaştırıldığında doğru sonuçlar veren basit bir modelleme yöntemi bulmaktır. Önerilen analitik model, ipliklerin krimpini dikkate alan geometrik modellemeye dayanmaktadır. Sonuç olarak, tüm kompozitler için sadece bir gerinim varsayımını temel alan analitik modelin, özellikle açılı-interlok yapılarda iyi sonuç vermeyeceği gösterilmiştir.

Dhiman ve ark. (2015) bağlayıcı iplik konfigürasyonunun, 3D dokuma kompozitler üzerindeki etkisini inceleyen, tahmine dayalı bir modelleme aracı üzerine çalışma yapmışlardır. Bunun için kompozitlerin çekme yükleri altındaki özelliklerini belirlemek için orta ölçekli bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Texgen® yazılımı kullanılarak mikroskobik ölçümlere dayanan ideal bir orta ölçekli temsili birim hücre oluşturulmuş ve gerilme yüklemesini simüle etmek ve birim hücrenin tekrarlanabilirliğini sağlamak için periyodik sınır koşulları uygulamışlardır. Sonuç olarak, numunelerin tahmin edilen

dayanımlarının, deneysel verilerle makul bir uyum içinde olduğu ve simüle edilmiş gerilim-gerinim davranışının deneysel verilerle iyi korelasyon içinde olduğu bulunmuştur. Ayrıca model, kesişme noktalarına yakın reçine yoğun bölgelerde gelişen ilk çatlakları ve daha sonra yüzey boyunca atkı yönünde ve bağlayıcı iplik boyunca kalınlık yönünde yayılan yüzey atkı çekmesini (pull-out) tahmin etmiş ve çözgü iplikleri kırılıncaya kadar çatlakların bu yollar boyunca yayılmaya devam ettiği belirlenmiştir.

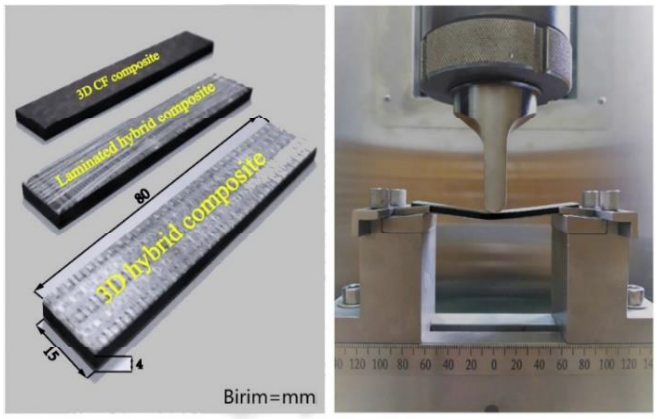
Wu ve ark. (2020), 3D ortogonal dokuma yapısında ve asimetrik karbon/cam hibrit kompozit yapıların (Şekil 2.6) darbe özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Çalışma sonunda sayısal sonuçlar ile deneysel veriler arasındaki karşılaştırma yaparak, 3D ortogonal dokuma yapının ve asimetrik karbon/cam hibridizasyonunun darbe dayanımı üzerindeki sinerjik etkisini değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak iplik seviyesindeki sonlu eleman modeli, tekstil kompozit malzemelerinin hasar ve kırılma mekanizmasını tahminlemek için yeterli bulunmuştur.



Şekil 2.6. Hibrit kompozitin sonlu eleman modeli (Wu ve ark. 2020).

Fan ve ark. (2019), yaptıkları çalışmada yeni tasarlanmış 3D ortogonal karbon/cam hibrit kompozitin eğilme özelliklerini, statik ve yorulma esaslı olarak incelemişlerdir. Bunun için 3D hibrit kompozit, 3D karbon kompozit ve lamine hibrit kompozit numuneler üretmişlerdir (Şekil 2.7). 3D hibrit kompozitin, 3D karbon kompozit ve lamine hibrit kompozit ile karşılaştırıldığında daha iyi eğilme özelliği gösterdiği sonucuna varmışlardır. Ayrıca, 3D hibrit kompozitteki cam lifinin, 3D karbon kompozite göre eğilme dayanımına daha fazla katkıda bulunduğu sonucuna varmışlardır. Z-bağlayıcı iplikler, lamine hibrit

kompozit ile karşılaştırıldığında 3D hibrit kompozit modülünün yüksek çıkmasında önemli rol oynamıştır.

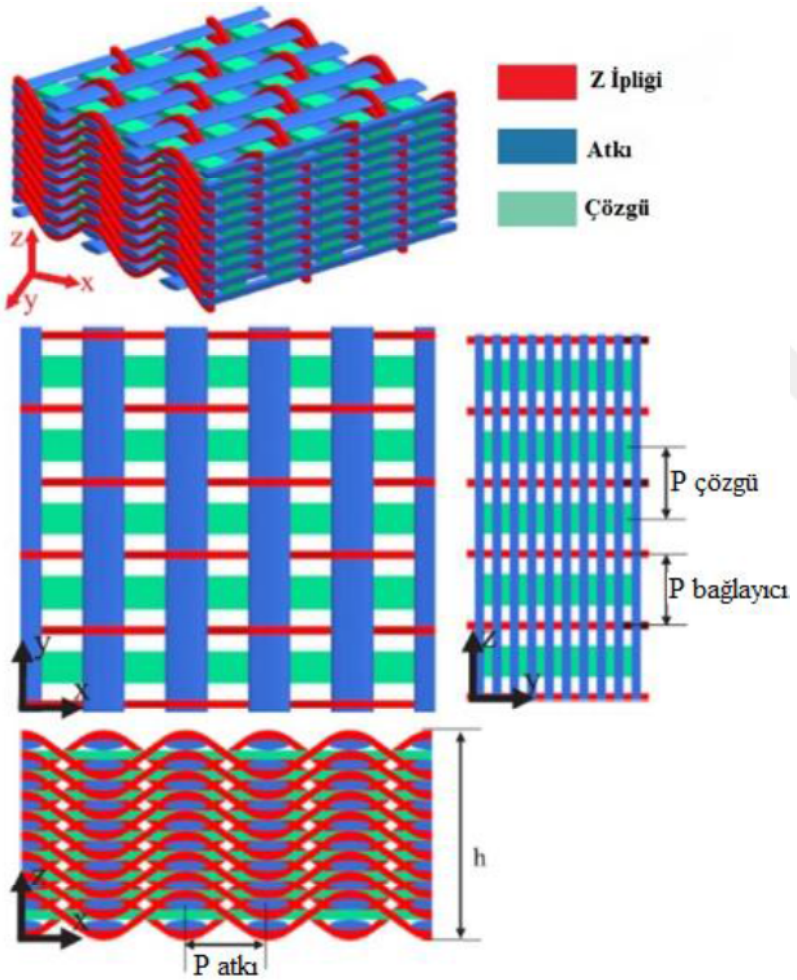


Şekil 2.7. Numunelerin ve test aparatların resmi (a) Numunenin boyutları (b) Üç nokta eğme testi (Fan ve ark. 2019).

Nayak ve ark. (2020), yaptıkları çalışmada 6 mm kalınlığında 3D E-cam takviyeli epoksi kompozitler üreterek, sırasıyla 0°, 30°, 45°, 60° ve 90° bağlayıcı iplik yönelimlerinin, mekanik performans üzerindeki etkisini belirlemişlerdir. Bu amaçla; çekme, eğme, katlararası ayrılma dayanımı testleri yapılmıştır. Ayrıca, sıkıştırma faktörünün kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Farklı kalınlıklardaki (4, 5 ve 7 mm) kompozit yapılar, 0° yönde aynı sayıda 3D E-cam kumaş ile üretilmiştir. Test sonuçları, 6 mm kompozit yapıdan elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, sıkıştırma faktörünün kompozitlerin mekanik özelliklerini etkilediğini ortaya koymuştur. Sıkıştırma faktörü arttıkça, mekanik özellikler belli bir oranda azalma eğilimine girmiştir.

Pankow ve ark. (2019) 3D dokuma tekstil kompozitlerinde hasarın nasıl başladığını belirlemek için iki farklı dokuma mimarisinin gerilme tepkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Z- bağlayıcı ipliği kullanılan doku mimarisi ile katmanlı 3D ortogonal doku mimarisine sahip kompozitler karşılaştırılmıştır. İki kompozitteki hasar detayları hem dijital görüntü korelasyonu, hem de bir boya penetranı kullanılarak yapılan inceleme sonrası analiz edilmiştir. Z- bağlayıcılı kompozit yapı, çok az esneklik gösterirken katmanlı 3D ortogonal yapı plastik benzeri davranış sergilemiştir. Yine Z- bağlayıcılı materyal kalınlıktan bağımsız özellikler gösterirken, katmanlı 3D ortogonal yapının özellikleri kalınlığa göre değişmiştir. Doku mimarisine bağlı bir gerinim alanı olduğu ve bunun lokal olarak hasarın başlamasına yol açtığı sonucuna varılmıştır.

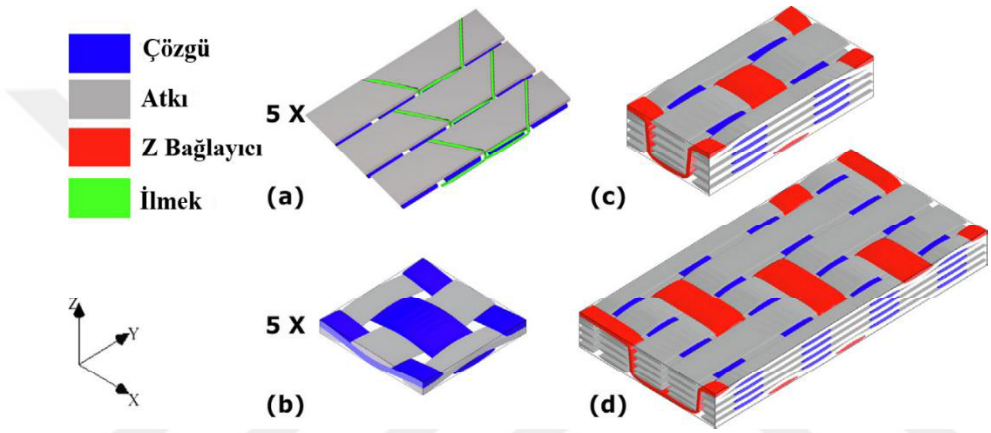
Zhang ve ark. (2019) eksen dışı açıların 3D dokuma karbon/epoksi kompozitlerin (Şekil 2.8) eğme davranışları üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. 0°, 30°, 45° ve 90° olmak üzere farklı açılara sahip dört çeşit numune 3- nokta eğme yöntemi ile deneysel olarak test edilmiştir. Eğme testi sonrası numunelerdeki deformasyon ve hasar mekanizmalarını araştırmak için ultrasonik görüntüleme ve mikro bilgisayarlı tomografi (Mikro-CT) teknikleri kullanmışlardır. Sonuç olarak, eksenel (0° ve 90°) numunelerin gerilim sapmalarının bariz yarı-kırılgan davranışlar sergilerken; eksen-dışı (30° ve 45°) numunelerin önemli sünek özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, 0° ve 90° numuneler ile karşılaştırıldığında, 30° ve 45° numunelerin daha düşük eğme dayanımı ve eğme modülü gösterdikleri ifade edilmiştir.



Şekil 2.8. 3D açılı interlok dokuma kompozitin şeması (Zhang ve ark. 2019).

Saleh ve ark. (2019) doku mimarisinin ve Z-bağlayıcı ipliklerin kompozitlerin çoklu darbe davranışından sonra basma dayanımı üzerindeki etkisini araştıran bir çalışma yapmışlardır. Bunun için, dört farklı kumaş yapısındaki kompozitleri incelemişlerdir. Bunlar

sırasıyla, kıvrımsız kumaş (biaxil noncrimp) (NFC), 2D dokuma (2D-PW), 3D ortogonal bezayağı dokuma (ORT-PW), 3D ortogonal dimi dokumadır (ORT-TW) (Şekil 2.9). Test örnekleri, 15 J enerji seviyesinde, tekli ve çoklu düşük hızlı darbelere maruz bırakılmıştır. Test sonrası hasar durumunu incelemek için ultrasonik C-tarama, X-ışını CT ve Dijital Görüntü Korelasyonu (DIC) gibi teknikler kullanılmıştır. Sonuç olarak; birim hücre boyutuna bakılmaksızın, 3D dokuma kompozitlerin, 2D kompozitlere (NCF ve 2D-PW) kıyasla darbe esaslı yüklemede hasar ve delaminasyona karşı daha dirençli olduğu görülmüştür. Ayrıca, birim hücre boyutu ne kadar küçükse, aynı darbe enerjisinin neden olduğu hasarın o kadar az olduğu sonucuna varılmıştır.

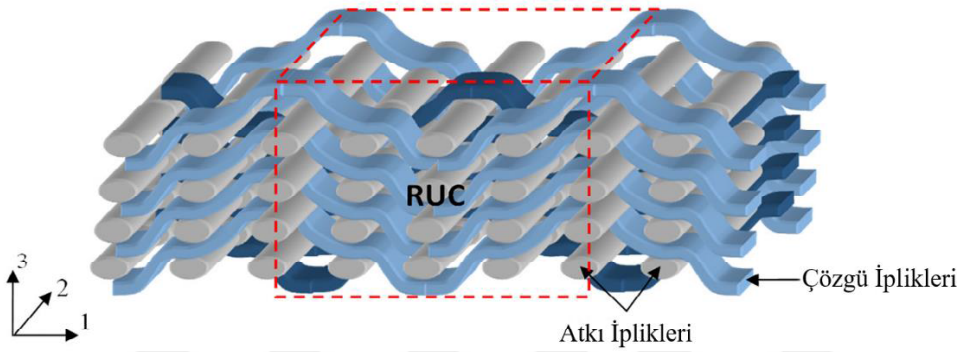


Şekil 2.9. Kompozitlerin şematik gösterimi, (a) kıvrımsız kumaş (NFC), (b) 2D düz örgü (2D-PW), (c) 3D ortogonal beazayağı örgü (ORT-PW), (d) 3D dimi ortogonal (ORT-TW) (Saleh ve ark. 2019).

Zhou ve ark. (2020), 3D karbon dokuma kompozitlerin çekme, katlararası ayrılma ve düşük hızda darbe özelliklerini tek yönlü katmanlı (UD) kompozit yapı ve 2D dokuma (2DW) kompozitlerle kıyaslamıştır. 3D kompozitinin, UD ve 2DW kompozitlerle karşılaştırılabilir düzlemsel çekme dayanım ve modülüne sahip olduğu, ancak katmanlararası arası çatlak yayılmasına ve darbe hasarına karşı daha yüksek bir direnç sunduğunu tespit etmişlerdir.

Munoz ve ark. (2014) hibrit 3D dokuma kompozitin deformasyon ve kırılma mikro mekanizmalarını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bunun için kompozit numuneler atkı ve çözgü yönlerinde kırılana kadar test edilmiştir. Hibrit 3D dokuma kompozitin deformasyon ve kırılma davranışının, elastik deformasyonun, yükleme yönünde yönlendirilmiş liflerin elastik modülü ve lif miktarından etkilendiği belirlenmiştir.

Tableau ve ark. (2019) düzlemsel gerilim ve düzlem-dışı kayma yükleri dâhil olmak üzere çok eksenli yüklemeler altında, polimer matrisli bir 3D dokunmuş kompozitteki (Şekil 2.10) ilk hasarın oluşumunun deneysel olarak belirlenmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Kompozit yapıda uygun gerilme durumlarını oluşturmak için, dikdörtgen çubuklara orantılı çekme-burulma yükü uygulanmıştır. İlk hasar oluşumunu belirlemek için, çeşitli tamamlayıcı araştırma ölçüm tekniklerinin kullanımına dayalı bir metodoloji geliştirilmiştir. Sonuç olarak çok eksenli yüklemenin neden olduğu gerinim modelleri, tek eksenli yüklemelerin her biri tarafından uyarılan gerinim modellerinin toplamına neredeyse eşit olarak tespit edilmiştir.

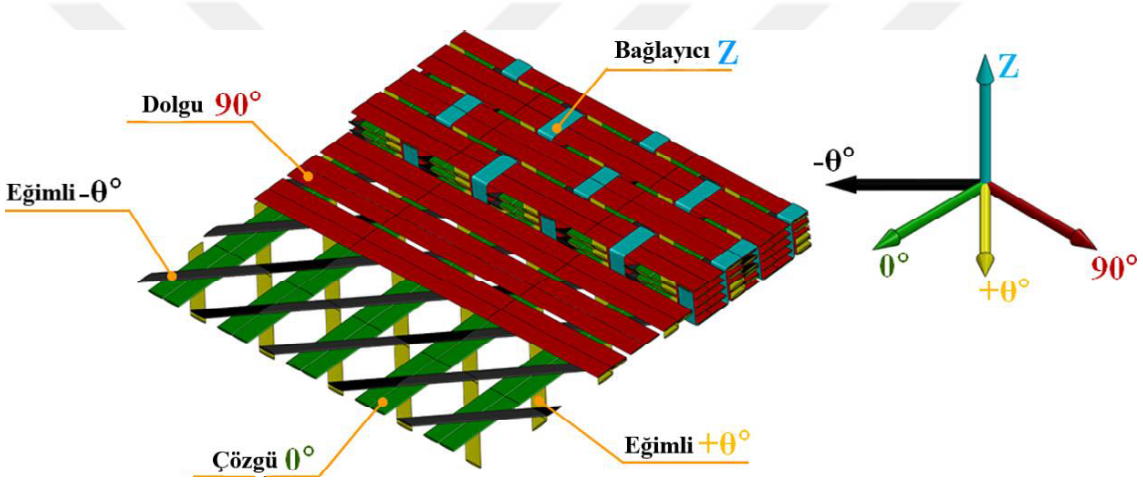


Şekil 2.10. 3D dokuma kompozitte bulunan tipik bir dokuma deseninin çizimi (Tableau ve ark. 2019).

Madke ve Chowdhury (2019) 2D ve 3D dokuma kompozitlerin kırılma ve hasar başlangıcını daha hızlı ve daha uygun maliyetli analiz eden çok ölçekli bir tahminleme modeli önermişlerdir. Bunun için 2D ve 3D dokuma kompozit, düzlemsel ve düzlem dışı mekanik özellikler ve Z-bağlayıcı iplik etkisi bakımından modellenmiş ve analiz edilmiştir. Önerilen yaklaşımın doğruluğu, literatür verileri ile tahmin edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir. Dokuma kompozitlerin, belirli bir yöndeki sertliği ve dayanımının, esas olarak çözgü, atkı veya bağlayıcı ipliklerin yönsel lif hacmi oranına bağlı olduğu belirlenmiştir.

Ewert ve ark. (2020) 3D ortogonal dokuma kompozitin elastik özelliklerini ve termal iletkenliğini tahmin etmek için iki orta ölçekli geometrik yapı geliştirmişlerdir. Geometrik yapı oluşturmada kullanılan iki yaklaşım, kumaş mekaniği simülasyonu ve X-ışını mikrotomografisi verilerinin doğrudan işlenmesidir. Sonuç olarak çözgü, atkı ve bağlayıcı iplik gruplarının hacimsel oranlarının kullanıldığı mikrotomografi esaslı geometrik modelin, elastik modülü tahminleme bakımından daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir.

Labanieh ve ark. (2017) üç farklı doku mimarisini göz önünde bulundurarak, 3D çok eksenli dokuma kompozitlerin (Şekil 2.11) düzlemsel ve düzlem-dışı mekanik özellikleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. İlk iki yapı, 0° ve 90° ipliklere ek olarak çapraz yönlendirilmiş ipliklerden oluşmuştur. Diğer yapı ise, yalnızca 0° ve 90° yönlendirilmiş ipliklerden oluşan klasik 3D ortogonal dokuma yapısında üretilmiştir. Gerinim alanını ölçmek ve çatlama süreçlerinin görsel analizini kaydetmek için tüm mekanik testler dijital görüntü korelasyonu sistemi ile donatılmıştır. Sonuç olarak, çapraz ipliklerin 0° ve 90° derece ipliklere eşlik ettiği kompozitlerin, klasik 3D ortogonal dokuma tekstil kompozitlere kıyasla gelişmiş mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, deneysel sonuçlara dayanarak, 3D çok eksenli dokunmuş kompozitlerin, klasik 3D ortogonal kompozitlere kıyasla gelişmiş laminar kayma mukavemeti sergilediği sonucuna varılmıştır.



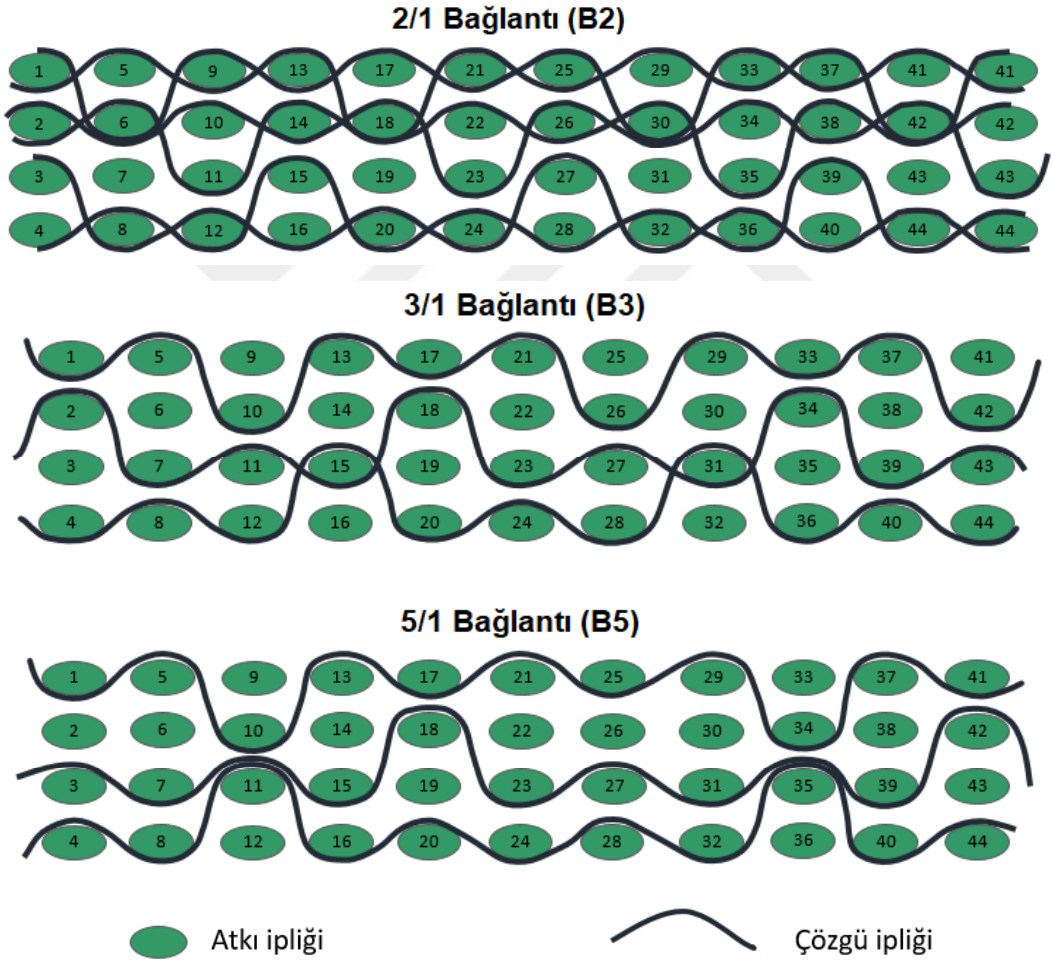
Şekil 2.11. 3D çok eksenli dokuma mimaride lif yerleşiminin şematik görünümü (Labanieh ve ark. 2017).

Bu tez çalışmasında geliştirilen çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitler; dokuma yapının kat sayısı ve bağlantı sayısı gibi konstrüksiyon özellikleri ile hammadde olarak kullanılan polipropilen ve cam lifinin hibritlenmesi ile ortaya çıkan yapısal özellikler bakımından literatürdeki çalışmalardan farklıdır. Geliştirilen çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin hem mekanik hem de darbe özelliklerinin ayrıntılı bir biçimde incelenmesi ile, yapısal değişkenlerin etkisi belirlenmiştir.

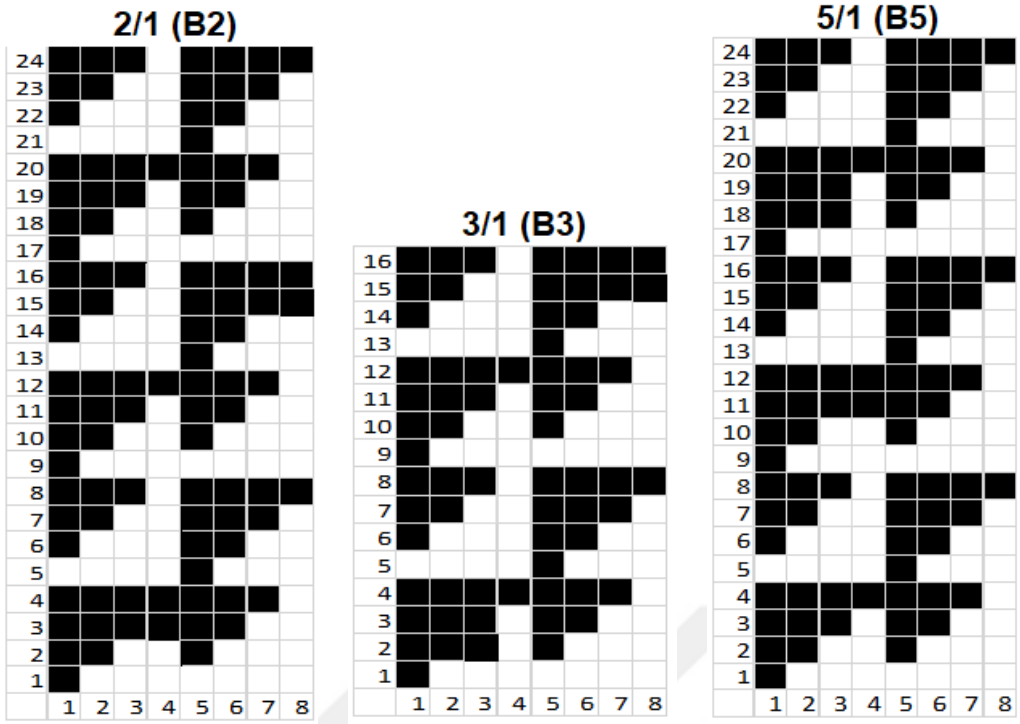
3. MATERYAL VE METOT

3.1. Çok Katlı 3D Hibrit Dokuma Preformların Üretilmesi

Çok katlı 3D hibrit dokuma preformlarda, çözgü ipliği olarak BCF (Bulk Continuous Filament) polipropilen (150 tex, Eruslu Tekstil, Türkiye), atkı ipliği olarak ise E-cam lifleri (2400 tex, Cam Elyaf, Türkiye) kullanılmıştır. Bu lifler, çok katlı 3D dokuma yöntemi ile 4 katlı olarak 3 farklı bağlantı (çözgü bağlantılı) tipinde (2/1, 3/1, 5/1) bezayağı örgüde üretilmiştir. Şekil 3.1'de bağlantı tiplerinin şematik görüntüsü, Şekil 3.2'de ise armür planları verilmiştir.



Şekil 3.1. Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların bağlantı tiplerinin şematik gösterimi.



Şekil 3.2. Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların armür planları.

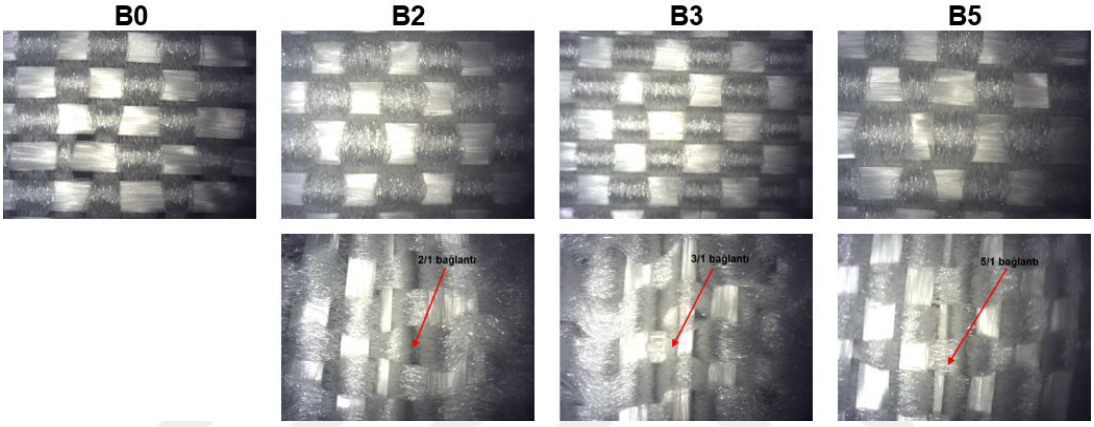
Karşılaştırma yapmak amacıyla, aynı iplik setleri ve dokuma parametreleri kullanılarak 2D bezayağı dokuma kumaş üretilmiş ve 4 katlı olarak $[0°]_4$ kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Buna göre; 4 farklı tipte preform geliştirilmiştir. Çizelge 3.1'de, geliştirilen çok katlı 3D hibrit dokuma preformlar tanımlanmıştır.

Çizelge 3.1. Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların tanımlanması.

Kod	İplik setleri		Örgü tipi	Bağlantı tipi	Kat sayısı	Tanım
	Çözgü	Atkı				
B0	PP	E-cam	Bezayağı	Bağlantısız	1 kat	2D
B2	PP	E-cam	Bezayağı	2/1	4 kat	3D
B3	PP	E-cam	Bezayağı	3/1	4 kat	3D
B5	PP	E-cam	Bezayağı	5/1	4 kat	3D

Çok katlı 3D dokuma preformların ve 2D dokuma kumaşın üretimi, manuel dokuma tezgâhında (GARM-55, Gülas Makine, Türkiye) gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.3'te, çok katlı 3D hibrit preformların dokunması esnasındaki görüntüler verilmiştir. Şekil 3.4'te ise, dokunan preformların mikroskobik yüzey ve bağlantı noktalarındaki kesit görüntüleri verilmiştir.

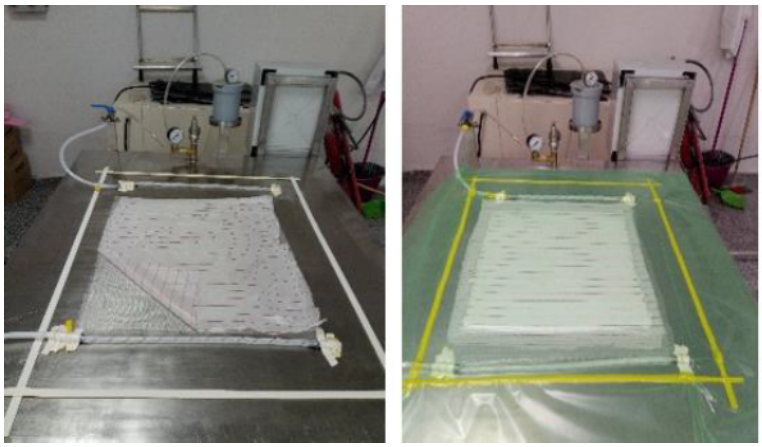
Şekil 3.3. Çok katlı 3D hibrit preformların dokunması.



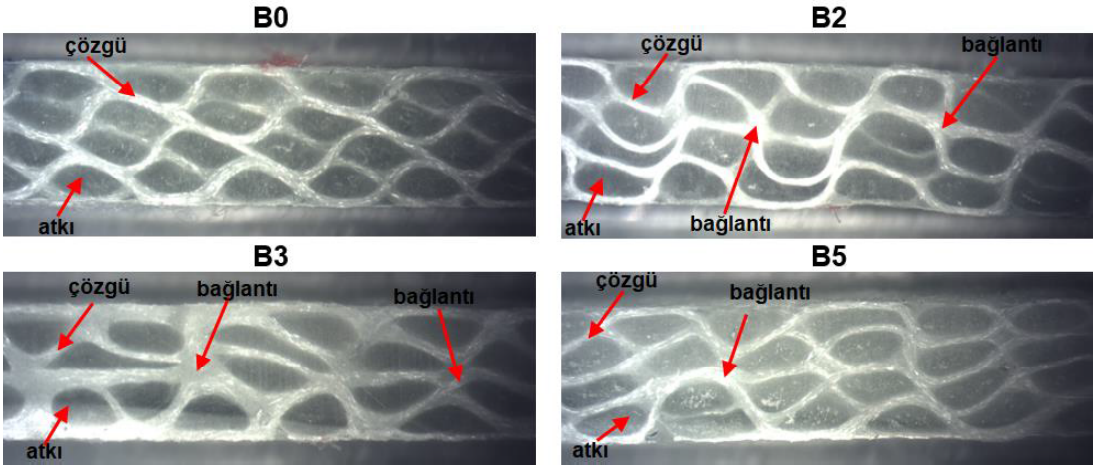
Şekil 3.4. Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların mikroskobik görüntüleri (×0,7).

3.2. Çok Katlı 3D Hibrit Dokuma Kompozitlerin Üretilmesi

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitler, vakum infüzyon (VARTM) metoduna göre epoksi reçine (Hexion MGS L160 reçine/Hexion MGS H160 sertleştirici, 100/25) kullanılarak kompozit formuna dönüştürülmüştür. Kürleşme işlemi 80°C'de 1 saat yapılmıştır. Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların (B2, B3 ve B5) 4 katlı olarak dokunmasından dolayı, 2D bağlantısız preform (B0) 4 katlı olarak $[0°]_4$ oryantasyonunda üretilmiştir. Şekil 3.5'te VARTM (vakum infüzyon) metoduna göre kompozit üretimi verilmiştir. Şekil 3.6'da, üretilen çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin mikroskobik ön yüz ve atkı kesit görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.5. VARTM metoduna göre kompozit üretimi.



Şekil 3.6. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin yüzey görüntüleri (×0,7).

3.3. Çok Katlı 3D Hibrit Dokuma Preformlara Uygulanan Testler

3.3.1. Kalınlık tayini

Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların kalınlık ölçümleri, ISO 5084 test standardına göre kalınlık ölçer (SDL Atlas, J200) ile yapılmıştır. Kalınlık ölçümleri, her bir preformun 3 farklı bölgesinden yapılmıştır.

3.3.2. Gramaj tayini

Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların gramaj ölçümleri, ISO 6348 test standardına göre hassas terazi (Denver Instrument, Almanya) kullanılarak 3'er tekrarlı olarak yapılmıştır.

3.3.3. Sıklık tayini

Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların atkı ve çözgü yönündeki sıklık tayini, TS 250 EN 1049-2 test standardına göre 3'er tekrarlı olarak belirlenmiştir.

3.3.4. Krimp ölçümü

Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların atkı ve çözgü yönündeki krimp ölçümleri, ISO 7211-3 test standardına uygun olarak her bir yön için 10'ar tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.5. Preform Lif Miktarı Tayini

Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların ağırlıkça lif miktarları, 10 × 10 cm boyutundaki numunenin başlangıç ağırlığının ve daha sonra içerdiği Polipropilen ve E-Cam liflerinin ağırlığının ayrı ayrı sökülerek hassas terazide (Denver Instrument, Almanya) tartılması ile belirlenmiştir.

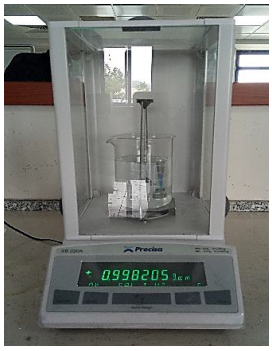
3.4. Çok Katlı 3D Hibrit Dokuma Kompozitlere Uygulanan Testler

3.4.1. Kompozit Kalınlığı

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin kalınlık ölçümleri, dijital kumpas kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kalınlık ölçümleri, 3'er tekrarlı olarak yapılmıştır.

3.4.2. Kompozit Yoğunluğu

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin test boyutlarına uygun biçimde kesilmesinin ardından, yoğunlukları ASTM D792-13 test standardına uygun olarak oda sıcaklığında yoğunlukölçer (Precisa®, XP205) ile belirlenmiştir. 30 × 30 mm boyutunda kesilen numunelerin yoğunluk ölçümleri 3'er tekrarlı olarak yapılmıştır. Şekil 3.7'de, kompozit yoğunluğu ölçümü esnasındaki görüntüler verilmiştir.



Şekil 3.7. Kompozit yoğunluk ölçümü.

3.4.3. Kompozit Lif Miktarı Tayini

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin lif miktarı tayini ASTM D3171-15 test standardına göre yapılmıştır. Lif miktarı değeri, ağırlık esaslı olarak aşağıdaki formül (3.1) kullanılarak hesaplanmıştır. Test numuneleri, 30 × 30 mm boyutlarında kesilerek hazırlanmış ve kül fırınında 600°C'de 1 saat bekletilmiştir. Her bir örnekten 3'er tekrarlı test gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8'de, lif miktarı tayini ile ilgili görüntüler verilmiştir.

$$\%\ Ağırlık\ Esaslı\ Lif\ Miktarı = (W / w) \times 100 \tag{3.1}$$

Burada; W: Lif ağırlığı (g), w: Kompozit ağırlığı (g).

Şekil 3.8. Kompozit lif miktarı tayini.

3.4.4. Eğme testi

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 3-nokta eğme dayanımı testi ASTM D790-90 standardına göre universal mukavemet test cihazında (Hounsfield, H5KS, UK) gerçekleştirilmiştir. Eğme testi, atkı yönünün (E-cam lifleri) normali doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Test numunesi boyu 80 mm, destek mesafesi 50 mm ve test hızı 1.3 mm/dak. olarak uygulanmıştır. Şekil 3.9'da, kompozit yapıların eğme testi esnasındaki görüntüleri verilmiştir.

Şekil 3.9. Kompozit yapıların eğme testi esnasındaki görüntüleri.

ASTM D790-90 test standardında belirtilen formüller kullanılarak, eğme dayanımı (3.2), eğme modülü (3.3) ve uzama (3.4) değerleri hesaplanmıştır.

$$S = 3PL / 2bd^2 \tag{3.2}$$

$$E = L^3 m / 4bd^3 \tag{3.3}$$

$$\varepsilon = 6Dd / L^2 \tag{3.4}$$

Burada; S: eğme dayanımı (N/m^2), P: yük (N), L: destek mesafesi (m), b: numune eni (m), d: numune kalınlığı (m), E: eğilme modülü (N/m^2), m: yük-uzama eğrisinin eğimi (N/m), ε: deformasyon (mm/mm), D: numunenin merkezindeki maksimum deformasyon (mm).

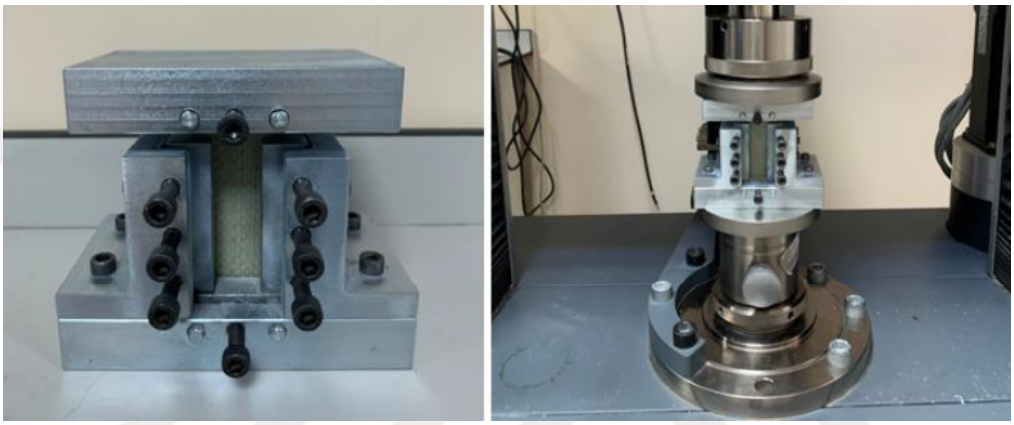
3.4.5. Darbe Testi

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin darbe dayanımı testi ASTM D7136-15 (2015) test standardına uygun olarak, düşen ağırlık (drop-weight) test metoduna göre 15J, 30J ve 60J enerji seviyelerinde, her bir seviye için 3 tekrarlı test ile gerçekleştirilmiştir. Darbe testleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Tekstil Fakültesi Laboratuarı'nda bulunan drop test cihazında (BESMAK) gerçekleştirilmiştir. Numune boyutları 55 x 89 mm'dir. 16 mm çapındaki yarı-küresel uç geometrisindeki vurma ucu kullanılmıştır (Şekil 3.10).

Şekil 3.10. Kompozit yapıların darbe testi esnasındaki görüntüleri.

3.4.6. Basma ve Darbe Sonrası Basma (CAI) Testleri

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin basma ve darbe sonrası basma dayanımları, ASTM D7137/7137M-17 (2017) standardına göre, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, ÜSKİM'de bulunan cihaz (Zwick-Roell) kullanılarak belirlenmiştir. Numune boyutları 55 x 89 mm, test hızı ise 0.5 mm/dak. olarak uygulamıştır. Basma testi, darbe testi uygulanmayan numuneler için; CAI testi ise 15J, 30J ve 60J enerji seviyelerinde darbe testi uygulanan numuneler için 3'er tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.11'de, CAI testi esnasındaki numune görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11. Kompozit yapıların basma testi esnasındaki görüntüleri.

3.4.7. Darbe Sonrası Hasar Analizi (Ultrasonik C-Scan)

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin, 15J, 30J ve 60J enerji seviyelerinde darbe yüküne maruz kaldıktan sonra hasar analizleri Ultrasonik C-Scan yöntemi ile yapılmıştır. Ölçümler, 1 MHz frekansa sahip prob çifti ile through transmission (TTU) yöntemine göre US100 daldırma tipi ultrasonik görüntüleme cihazında gerçekleştirilmiş ve alınan görüntüler işlenerek bozunan alan hesaplamaları yapılmıştır.

3.4.8. Mikroskobik Analiz

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin yüzey ve kesit görüntüleri, optik mikroskop ve görüntü işleme yazılımı (Bs200DOC, Türkiye) kullanılarak alınmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Çok Katlı 3D Hibrit Dokuma Preformların Özellikleri

Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Buna göre, B0 kumaşı tek kat ve bağlantısız olduğundan dolayı, çok katlı 3D dokuma preformlara göre (B2, B3, B5) daha düşük kalınlık ve gramaja sahiptir. Preformların lif miktarları incelendiğinde, atkı ipliği olarak kullanılan E-cam lifinin ağırlıkça oranı yaklaşık %90, çözgü ipliği olarak kullanılan PP lifinin ağırlıkça oranı ise yaklaşık %10'dur. Bu sayede, üretilecek kompozit yapıların dayanım ve modül değerlerinin arttırılması, PP lifinin kullanılması sayesinde ise kompozit yapıda belirli bir miktar süneklik sağlanması amaçlanmıştır.

Krimp oranları, E-cam lifinin rijit yapısından dolayı atkı yönünde, çözgü yönüne kıyasla daha düşüktür. E-cam lifine göre daha esnek yapıdaki PP lifinin çözgü yönünde kullanılması, bu yönde daha yüksek krimp oranlarına neden olmuştur. En yüksek çözgü krimpi B2 yapısında görülmüş, bu yapıyı B3, B5 ve B0 yapıları takip etmiştir. Benzer eğilim atkı yönünde de geçerlidir. Buna göre, en yüksek atkı krimpini B2 yapısı göstermiş, bu yapıyı B3, B5 ve B0 yapıları izlemiştir. Tek kat bağlantısız B0 yapısının krimp oranlarının, çok katlı 3D dokuma yapılara kıyasla daha düşük olması beklenen bir durumdur. En fazla katlararası bağlantı sayısının B2 yapısında olmasından dolayı, bu yapının krimp oranları da B3 ve B5 yapılarına göre daha yüksektir (Kekil ve Kaya, 2021).

Çizelge 4.1. Çok katlı 3D hibrit dokuma preformların özellikleri.

Kod	Sıklık (tel/10 cm)		Krimp oranı (%)		Kalınlık (mm)	Gramaj (g/m^2)	Lif miktarı (ağırlıkça, %)	
	Çözgü	Atkı	Çözgü	Atkı			E-Cam	PP
B0	39	40	11,01	0,11	0,97	1000	90,0	10,0
B2	40	32	20,00	0,84	3,66	3600	89,9	11,1
B3	39	36	14,91	0,63	3,53	4100	92,7	7,3
B5	39	33	11,25	0,45	4,03	3800	92,1	7,9

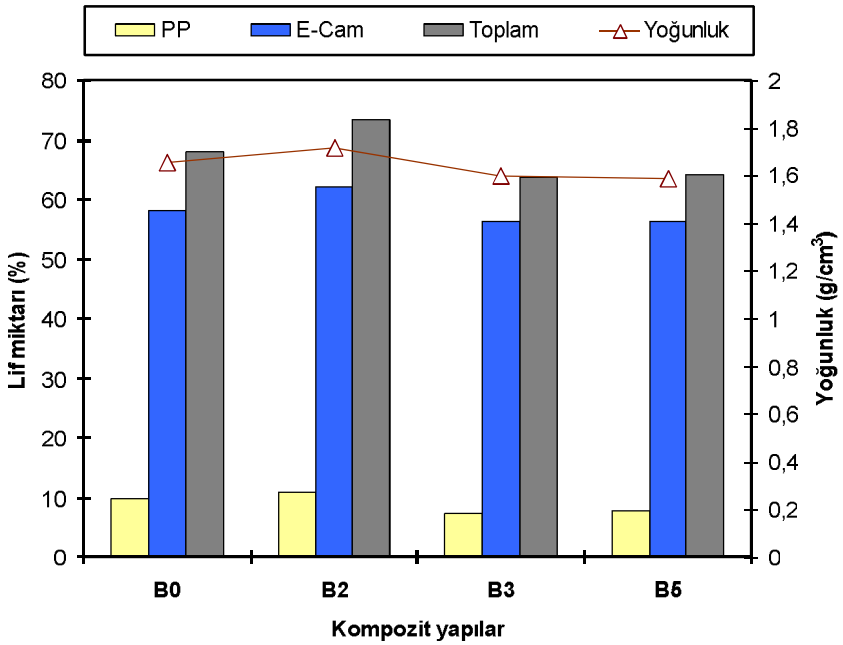
4.2. Kompozitlerin Kalınlık, Yoğunluk ve Lif Miktarı Sonuçları

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1'de, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin kalınlık, yoğunluk ve lif miktarı (ağırlıkça, %) sonuçları verilmiştir. Kompozit kalınlıkları 3,53 mm ile 3,88 mm arasındadır. Kompozit yoğunlukları ise 1,59 g/cm^3 ile 1,72 g/cm^3 arasında değişmektedir. En yüksek lif miktarına B2 kompozit yapı ile ulaşılmıştır. Bu nedenle en

yüksek yoğunluk değeri de B2 yapısına aittir. B2 yapısındaki katlararası bağlantı sayısının, B3 ve B5 yapılarına kıyasla daha yüksek olması, hem lif miktarı hem de kompozit yoğunluğunda artışa neden olmuştur. E-cam lifinin yoğunluğu, PP lifine kıyasla daha yüksek olduğundan, kompozit yapılarda E-Cam lif miktarındaki artışa bağlı olarak yoğunluk değerleri de daha belirgin bir artış sergilemiştir. Lif miktarları ve kompozit yoğunlukları, her bir kompozit yapı için uyumludur. Kompozit yapıdaki E-Cam lif miktarı arttıkça, kompozit yoğunlukları da artış göstermiştir (Kekil ve Kaya, 2021).

Çizelge 4.2. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin kalınlık, yoğunluk ve lif miktarı sonuçları.

Kod	Kalınlık (mm)	Yoğunluk (g/cm^3)	Lif miktarı (ağırlıkça, %)		
			E-Cam	PP	Toplam
B0	3,88 (±0,09)	1,66 (±0,01)	58,19	10,00	68,19
B2	3,66 (±0,03)	1,72 (±0,01)	62,30	11,11	73,42
B3	3,53 (±0,04)	1,60 (±0,02)	56,47	7,32	63,79
B5	4,03 (±0,09)	1,59 (±0,01)	56,31	7,89	64,20



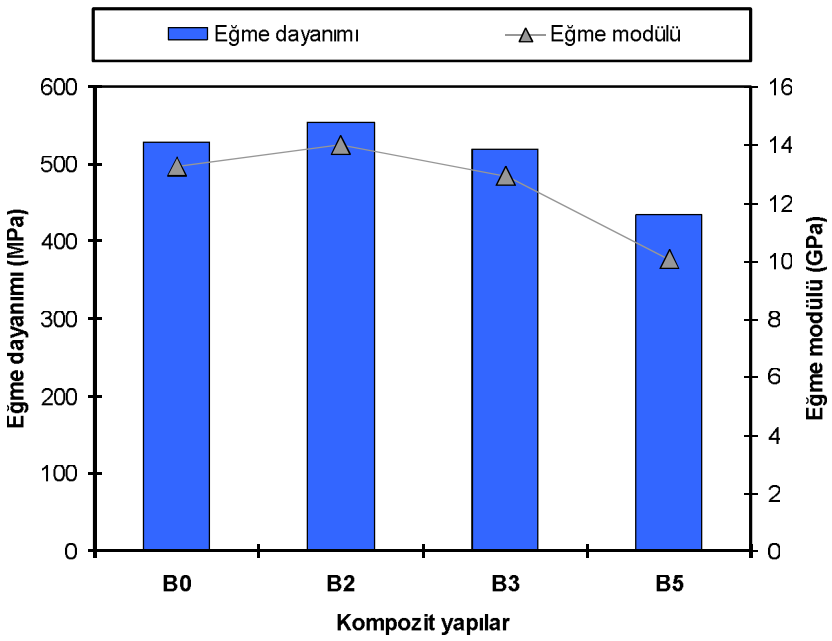
Şekil 4.1. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin lif miktarı ve yoğunluk sonuçları.

4.3. Kompozitlerin Eğme Testi Sonuçları

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.2'de, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin eğme testi sonuçları verilmiştir. Kompozit yapıların eğme dayanımı değerleri, 435,18 MPa ile 554,10 MPa arasındadır. En yüksek eğme dayanımını, B2 kompozit yapı göstermiştir. B2 kompozit yapıda, katlararası bağlantı sayısının fazla olması yapıyı daha kompakt bir hale getirerek, eğme yüküne karşı direncini arttırmıştır (Kekil ve Kaya, 2021). Eğmede, düzlem içi esnemelerin atkı yönünde meydana gelmesinden dolayı, bağlantı iplikleri tarafından güçlü bir şekilde direnç gösterilmektedir (Sudarisman ve Davies, 2008, Dong ve ark., 2012). B2 kompozit yapının eğme dayanımını, B3 ve B5 kompozit yapıları izlemiştir. Katlararası bağlantı sayısı arttıkça eğme dayanımlarının da arttığı sonucuna varılmıştır (Fan ve ark., 2019). Ayrıca, B2 kompozit yapıda lif miktarının yüksek olması da, eğme dayanımını arttırmıştır (Madke ve Chowdhury, 2019).

Çizelge 4.3. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin eğme testi sonuçları.

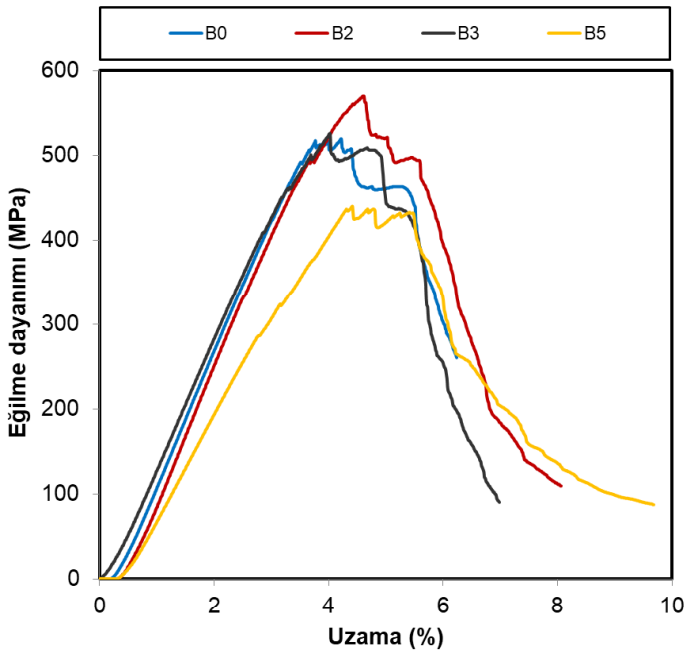
Kod	Eğme dayanımı (MPa)	Eğme modülü (GPa)	Uzama (%)
B0	529,48 (±8,83)	13,28 (±0,64)	4,16 (±0,38)
B2	554,10 (±11,91)	14,00 (±0,50)	4,44 (±0,22)
B3	521,07 (±6,07)	12,93 (±1,25)	4,05 (±0,10)
B5	435,18 (±6,60	10,07 (±0,73)	4,26 (±0,22)



Şekil 4.2. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin eğme testi sonuçları.

Benzer eğilim, eğme modülleri için de geçerlidir. Kompozit yapıların eğme modülü değerleri, 10,07 GPa ile 14,00 GPa arasındadır. En yüksek eğme modülünü, B2 kompozit yapı göstermiştir. B2 kompozit yapının eğme modülünü, B3 ve B5 kompozit yapıları izlemiştir. Katlararası bağlantı sayısı arttıkça eğme modüllerinin de arttığı sonucuna varılmıştır (Fan ve ark., 2019). Kompozit yapılar, genel olarak benzer uzama değerlerine sahiptir. B0 yapısının eğme dayanımı ve modülü ise B2 ve B3 kompozit yapıları ile benzerlik göstermektedir. Bağlantısız 2D dokuma kumaşın, katlararasında herhangi bir lif bağlantısı olmaksızın kompozit formunda üretildiği B0 yapısının, eğme yükü altındaki kırılma davranışlarının, 4 katlı olarak dokunan ve katlararasında belirli sıklıklarda lif bağlantısı olan 3D dokuma kompozitler ile farklılık gösterdiği belirlenmiştir (Pankow ve ark., 2019).

Şekil 4.3'te, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin eğme dayanımı-uzama eğrileri verilmiştir. Buna göre, kompozit yapıların benzer eğriler gösterse de, B5 kompozit yapının daha sünek bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Bağlantı sayısı arttıkça kompozitlerin eğme dayanım ve modülleri artmıştır ve en yüksek dayanım ve modül değerlerini ise katlararası bağlantı sayısı en fazla olan B2 kompozit yapı göstermiştir.



Şekil 4.3. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin eğme dayanımı-uzama eğrileri.

4.4. Kompozitlerin Darbe Testi Sonuçları

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin darbe testi sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da ise sırasıyla, kompozitlerin darbe testi

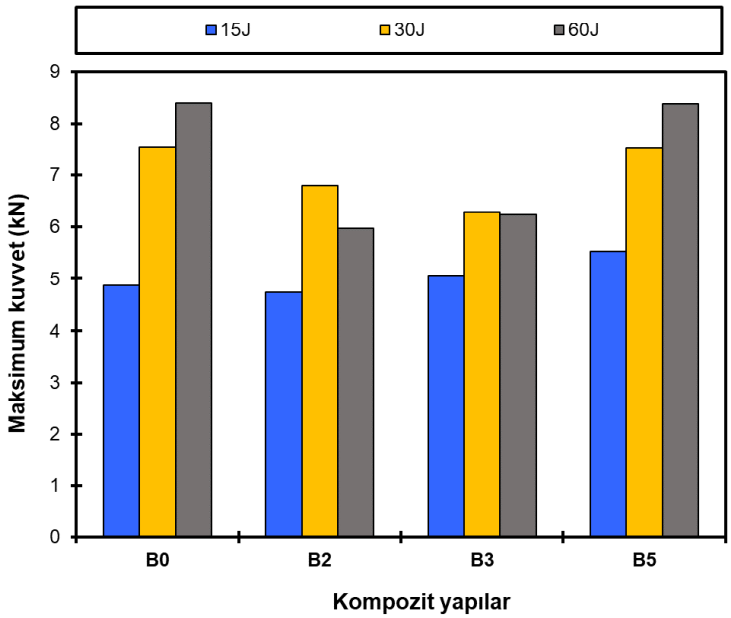
maksimum kuvvet, deformasyon ve absorplanan enerji değerleri verilmiştir. Darbe testi sonuçları değerlendirildiğinde, enerji seviyesi arttıkça maksimum kuvvet, deformasyon ve absorplanan enerjinin de artış gösterdiği belirlenmiştir.

Genel olarak, çok katlı 3D dokuma B5 kompozit yapının, diğer çok katlı 3D dokuma kompozitler (B2 ve B3) ve bağlantısız 2D dokuma kompozit yapıya (B0) kıyasla, her üç enerji seviyesinde de (15J, 30J ve 60J), daha yüksek darbe dayanım kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, bağlantısız 2D dokuma yapıda dört katmanının birbiri üzerine yerleştirilmesi, 3D dokuma kompozitlerde ise yapının z yönünde lif varlığından dolayı daha entegre bir yapı olmasıdır (Zhang ve ark., 2013). Bu da, 3D kompozit yapıların darbe dayanımı gerektiren uygulama alanlarında daha üstün ve tercih edilebilir olduğunu göstermektedir (Behera ve Dash, 2015).

Çok katlı 3D dokuma kompozitlerde, katlararası bağlantı sayısı arttıkça, darbe dayanım kuvvetinin düştüğü belirlenmiştir. Bu durumun, yapıların krimp oranlarıyla bağlantılı olduğu düşünülmektedir (Hang ve ark., 2021). Çok katlı 3D dokuma kompozitler arasında, en düşük krimp oranını B5 kompozit yapı gösterirken, en yüksek krimp oranını ise B2 kompozit yapı sergilemiştir.

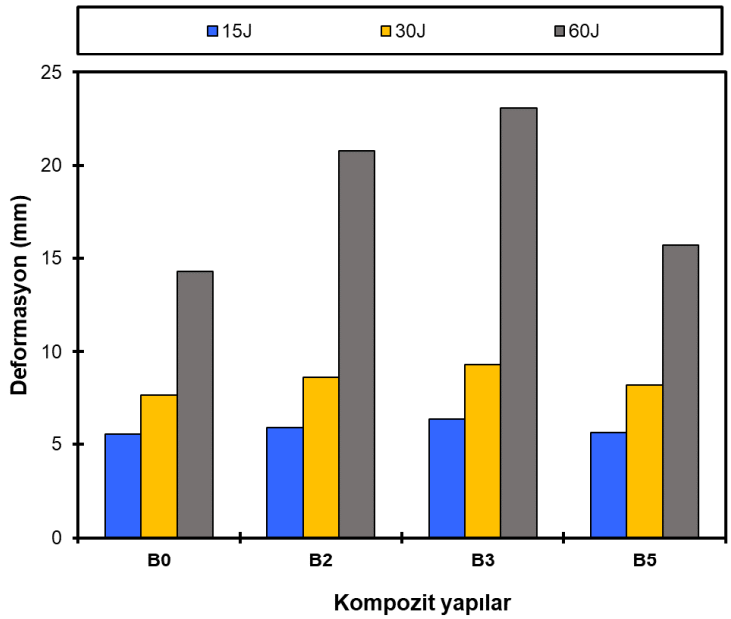
Çizelge 4.4. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin darbe testi sonuçları.

Darbe Enerjisi	Numune Kodu	Maksimum Kuvvet (kN)	Deformasyon (mm)	Absorplanan Enerji (J)
15J	**B0**	4,87 (±0,05)	5,54 (±0,05)	10,33 (±0,09)
	B2	4,74 (±0,21)	5,92 (±0,07)	10,38 (±0,21)
	B3	5,04 (±0,57)	6,37 (±0,34)	9,56 (±0,58)
	B5	5,53 (±0,53)	5,60 (±0,29)	9,49 (±0,39)
30J	**B0**	7,56 (±0,22)	7,66 (±0,13)	24,25 (±0,83)
	B2	6,79 (±0,24)	8,59 (±0,32)	25,93 (±1,14)
	B3	6,28 (±0,57)	9,326 (±0,51)	25,512 (±1,11)
	B5	7,55 (±0,14)	8,169 (±0,09)	23,582 (±0,25)
60J	**B0**	8,39 (±0,53)	14,311 (±1,54)	56,330 (±0,52)
	B2	5,98 (±0,21)	20,765 (±2,94)	52,465 (±5,54)
	B3	6,23 (±1,82)	23,126 (±5,67)	50,078 (±0,18)
	B5	8,37 (±0,50)	15,676 (±0,72)	56,500 (±0,01)



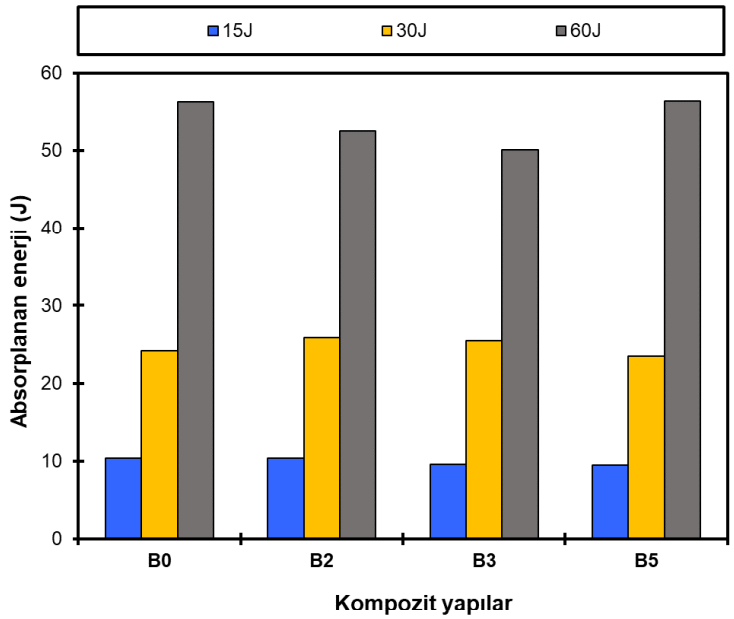
Şekil 4.4. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin darbe testi maksimum kuvvet değerleri.

Deformasyon değerleri bakımından, düşük enerji seviyelerinde (15J ve 30J) kompozit yapılar arasında belirgin bir farklılık görülmemiştir. Ancak, 60J enerji seviyesinde en düşük deformasyonu B0 kompozit yapı göstermiş ve bu yapıyı B5 kompozit yapı izlemiştir. B2 ve B3 kompozit yapılar, B0 kompozit yapıya kıyasla sırasıyla %31 ve %38 daha fazla deformasyon göstermiştir.



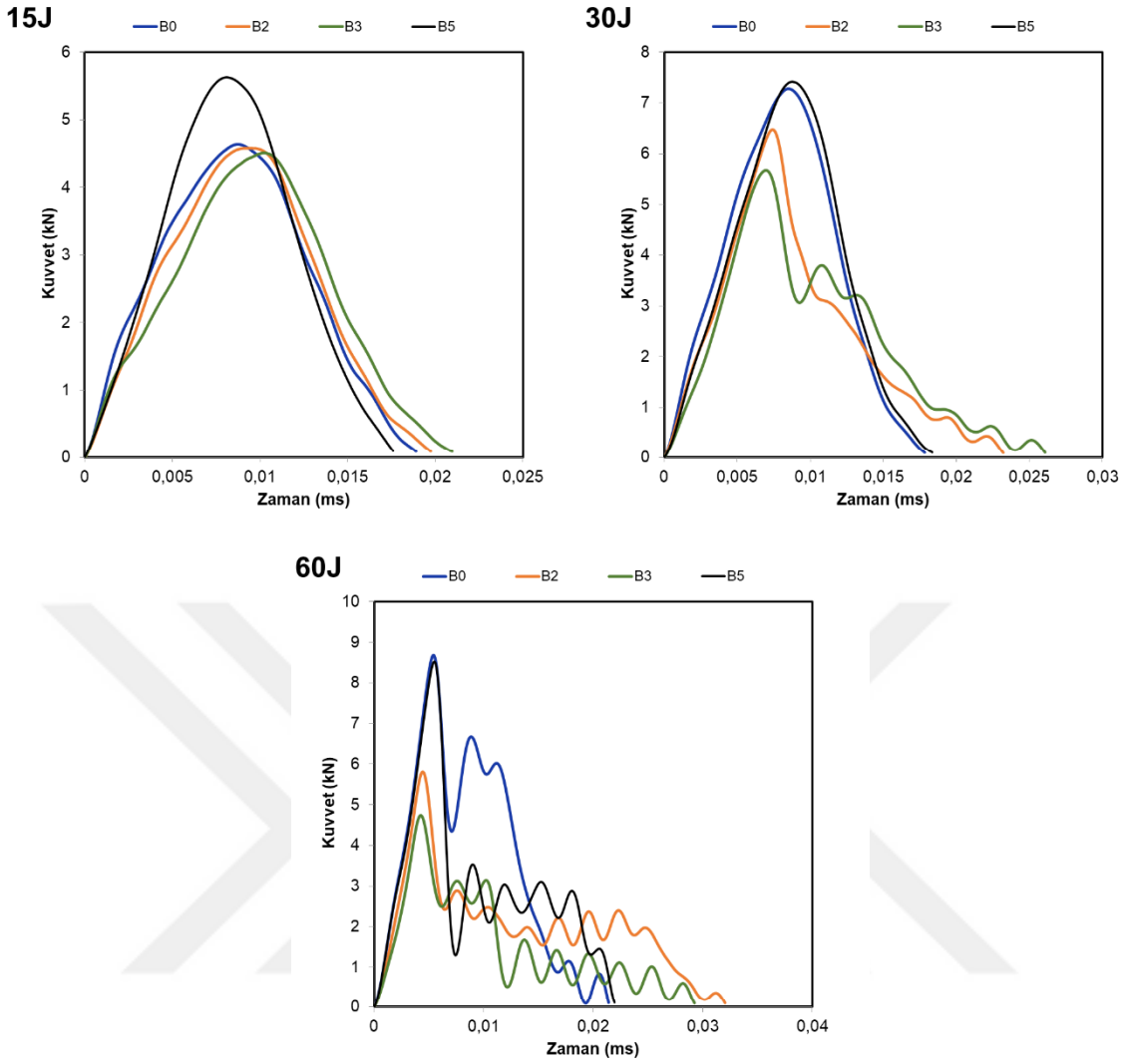
Şekil 4.5. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin darbe testi deformasyon değerleri.

Düşük enerji seviyelerinde (15J ve 30J), kompozit yapıların enerji absorpsiyonları arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Ancak, 60J enerji seviyesinde B0 ve B5 kompozit yapıların enerji absorpsiyonlarının, B2 ve B3 kompozit yapılara kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Çok katlı 3D dokuma kompozitler arasında, 60J enerji seviyesinde, en yüksek darbe dayanımı ve enerji absorpsiyonunu, en düşük deformasyonla sergileyen kompozit yapı B5 olarak belirlenmiştir. Bu durum, çok katlı 3D dokuma kompozitlerde katlararası bağlantı sayısı arttıkça, darbe dayanımında bir miktar düşüş olduğunu göstermektedir. B5 kompozit yapı, bağlantısız B0 kompozit yapıdan daha yüksek darbe dayanımı sergilemiştir.



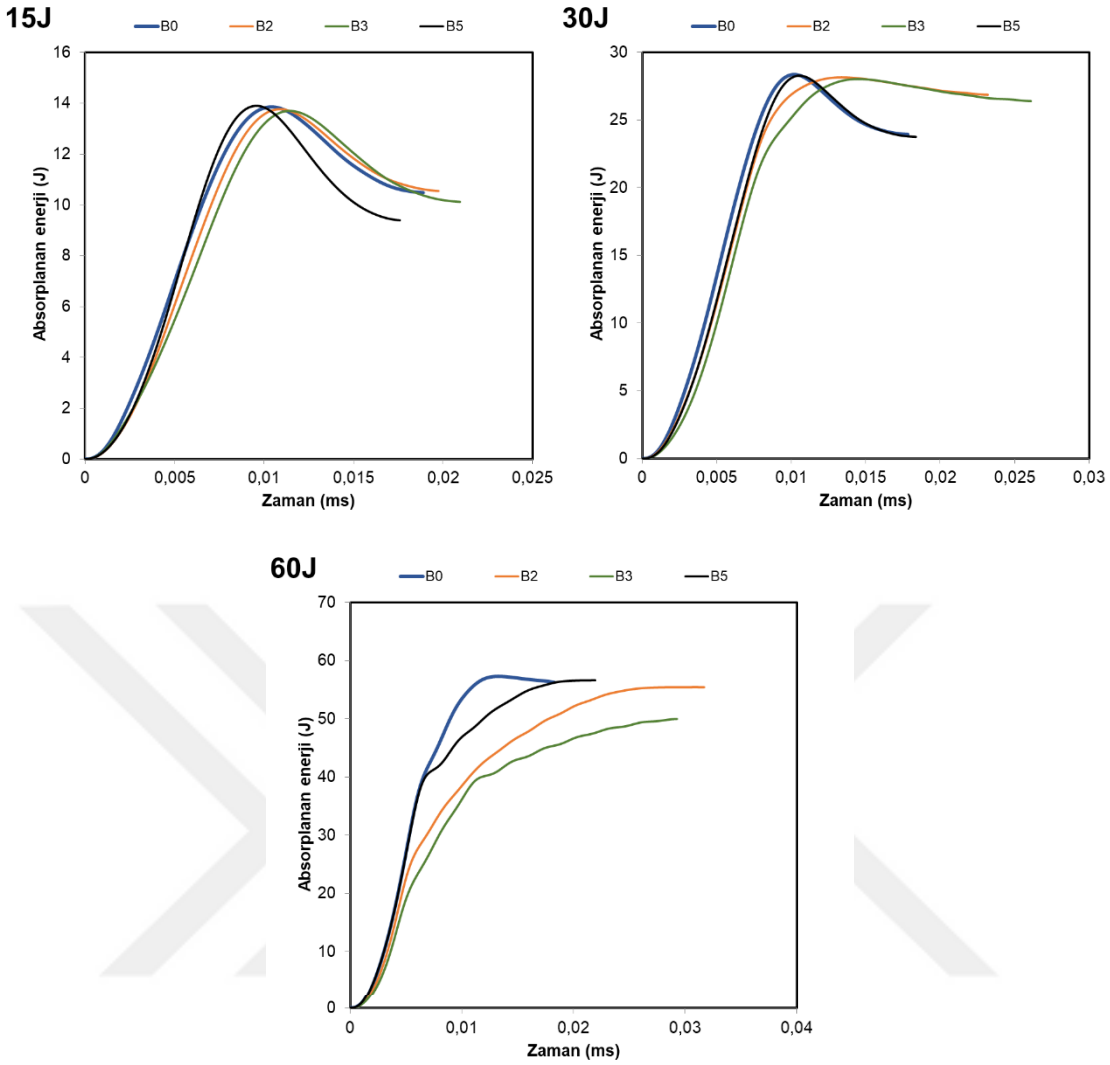
Şekil 4.6. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin darbe testi absorplanan enerji değerleri.

Şekil 4.7'de, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 15J, 30J ve 60J darbe enerjilerindeki kuvvet-zaman eğrileri verilmiştir. 15J enerji seviyesinde, B5 kompozit yapı daha yüksek darbe dayanım kuvveti göstermiştir. Benzer eğilim, 30J ve 60J enerji seviyelerinde de görülmüştür. Düşük katlararası bağlantı sayısındaki çok katlı 3D dokuma kompozitlerin, bağlantısız 2D kompozit yapılara kıyasla darbe dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



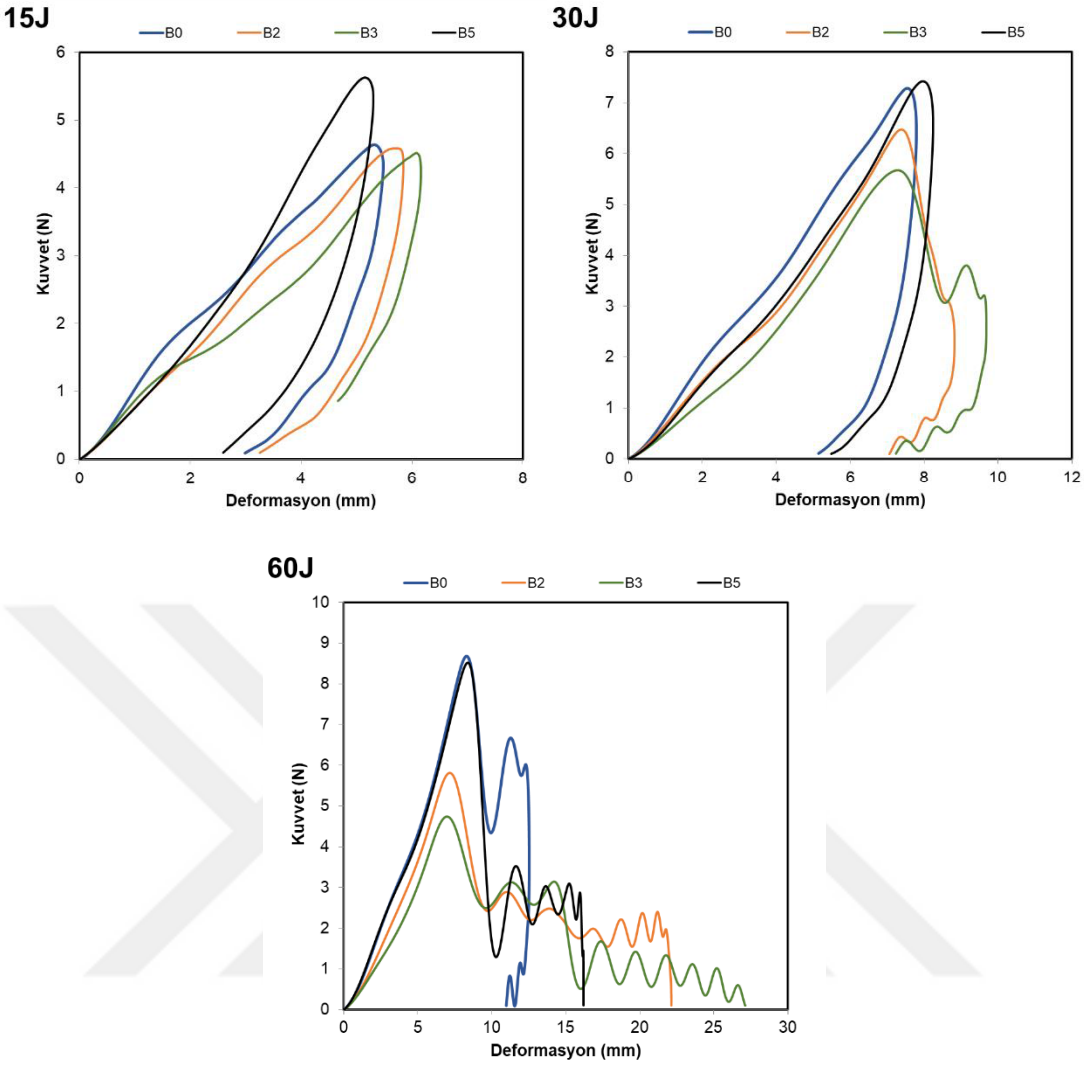
Şekil 4.7. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 15J, 30J ve 60J darbe enerjilerindeki kuvvet-zaman eğrileri.

Şekil 4.8'de, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 15J, 30J ve 60J darbe enerjilerindeki kuvvet-absorplanan enerji eğrileri verilmiştir. 15J enerji seviyesinde, kompozit yapıların tümünde elastik toplarlanma gerçekleşmiştir. Bağlantısız 2D kompozit yapı (B0) ile B2 ve B3 çok katlı 3D dokuma kompozitlerin benzer elastik toparlanma göstermesine karşın, B5 çok katlı 3D dokuma kompozit yapının daha yüksek elastik toparlanma gösterdiği belirlenmiştir. 30J enerji seviyesinde, B0 ve B5 kompozit yapılar elastik toplarlanma gösterirken, B2 ve B3 kompozit yapılarda kalıcı deformasyon gerçekleşmiştir. 60J enerji seviyesinde ise, tüm kompozit yapılar kalıcı deformasyon göstermiş, katastrofik lif/matris kırılmaları oluşmuştur.



Şekil 4.8. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin 15J, 30J ve 60J darbe enerjilerindeki kuvvet-absorplanan enerji eğrileri.

Şekil 4.9'da, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 15J, 30J ve 60J darbe enerjilerindeki deformasyon-kuvvet eğrileri verilmiştir. Genel olarak, her üç enerji seviyesinde de, B5 kompozit yapının darbe yükü altında daha az deformasyona uğradığı belirlenmiştir. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerde, katlararası bağlantı sayısı arttıkça yapıda daha fazla deformasyon gerçekleşmiştir. Ancak, bağlantısız 2D kompozit yapılara kıyasla, B5 kompozit yapının görece daha sünek bir yapı sergilediği söylenebilir.



Şekil 4.9. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 15J, 30J ve 60J darbe enerjilerindeki deformasyon-kuvvet eğrileri.

4.5. Kompozitlerin Basma ve Darbe Sonrası Basma (CAI) Test Sonuçları

Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin basma ve CAI testi sonuçları Çizelge 4.5 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin basma ve CAI testi dayanım-deformasyon eğrileri ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Darbe testi uygulanmayan kompozit yapıların basma dayanımları, 0J olarak ifade edilmiştir. Genel olarak, darbe testi uygulanmayan bağlantısız 2D dokuma (B0) ve çok katlı 3D dokuma (B2, B3 ve B5) kompozit yapıların basma dayanımları arasında büyük bir farklılık bulunmamakla birlikte, B0 yapısının basma dayanımının bir miktar daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Darbe testi uygulanmayan kompozit yapılarda, çok katlı 3D dokuma kompozitlerin (B2, B3 ve B5) basma modüllerinin ise, bağlantısız 2D dokuma kompozitlerden (B0) daha

yüksek olduğu görülmektedir. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerde, katlararası bağlantı sayısı arttıkça, basma modülünün arttığı belirlenmiştir. Bunun nedeni, bağlantısız 2D dokuma yapıda dört katmanının birbiri üzerine yerleştirilmesi, 3D dokuma kompozitlerde ise yapının z yönünde lif varlığından dolayı daha entegre bir yapı olmasıdır (Zhang ve ark., 2013). Darbe testi uygulanmayan kompozit yapılarda, en yüksek basma deformasyonunu bağlantısız 2D dokuma kompozitler (B0) gösterirken, bu yapıyı katlararası bağlantı sayısı düşük B5 kompozit yapı takip etmiştir. En düşük basma deformasyonunu, en fazla katlararası bağlantıya sahip B2 kompozit yapı göstermiştir. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerde, katlararası bağlantı sayısı arttıkça, basma deformasyonunun düştüğü, yapının rijitleştiği görülmüştür.

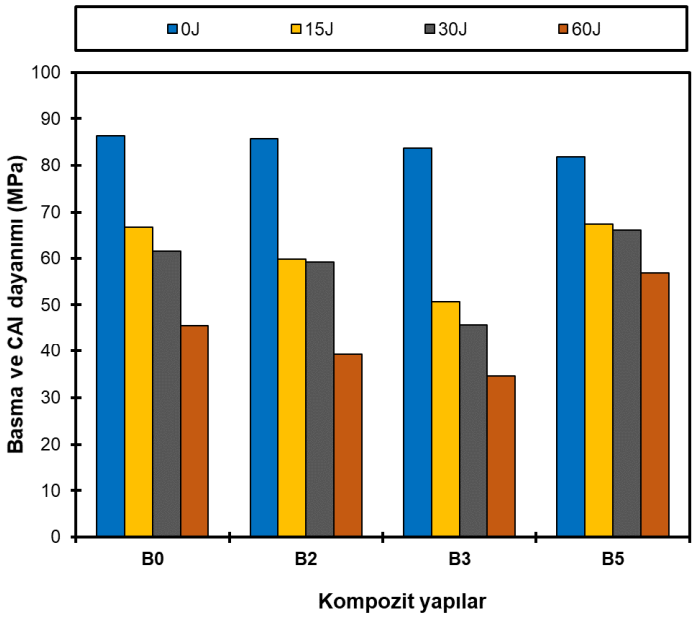
Çizelge 4.5. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin basma ve CAI testi sonuçları.

Kompozit kodu	Darbe enerjisi	Basma ve CAI dayanımı (MPa)	Basma ve CAI modülü (GPa)	Basma ve CAI deformasyonu (%)
B0	0J	86,28	2,85	3,60
	15J	66,64	2,68	2,90
	30J	61,44	1,61	2,79
	60J	45,65	1,45	2,67
B2	0J	85,81	3,83	3,09
	15J	59,86	1,60	1,88
	30J	59,17	1,59	2,30
	60J	39,24	1,47	3,20
B3	0J	83,75	3,71	3,33
	15J	50,68	2,89	2,10
	30J	45,78	2,07	2,31
	60J	34,57	1,54	5,01
B5	0J	81,86	3,68	3,57
	15J	67,56	3,57	2,26
	30J	65,99	2,95	2,13
	60J	56,82	2,78	3,60

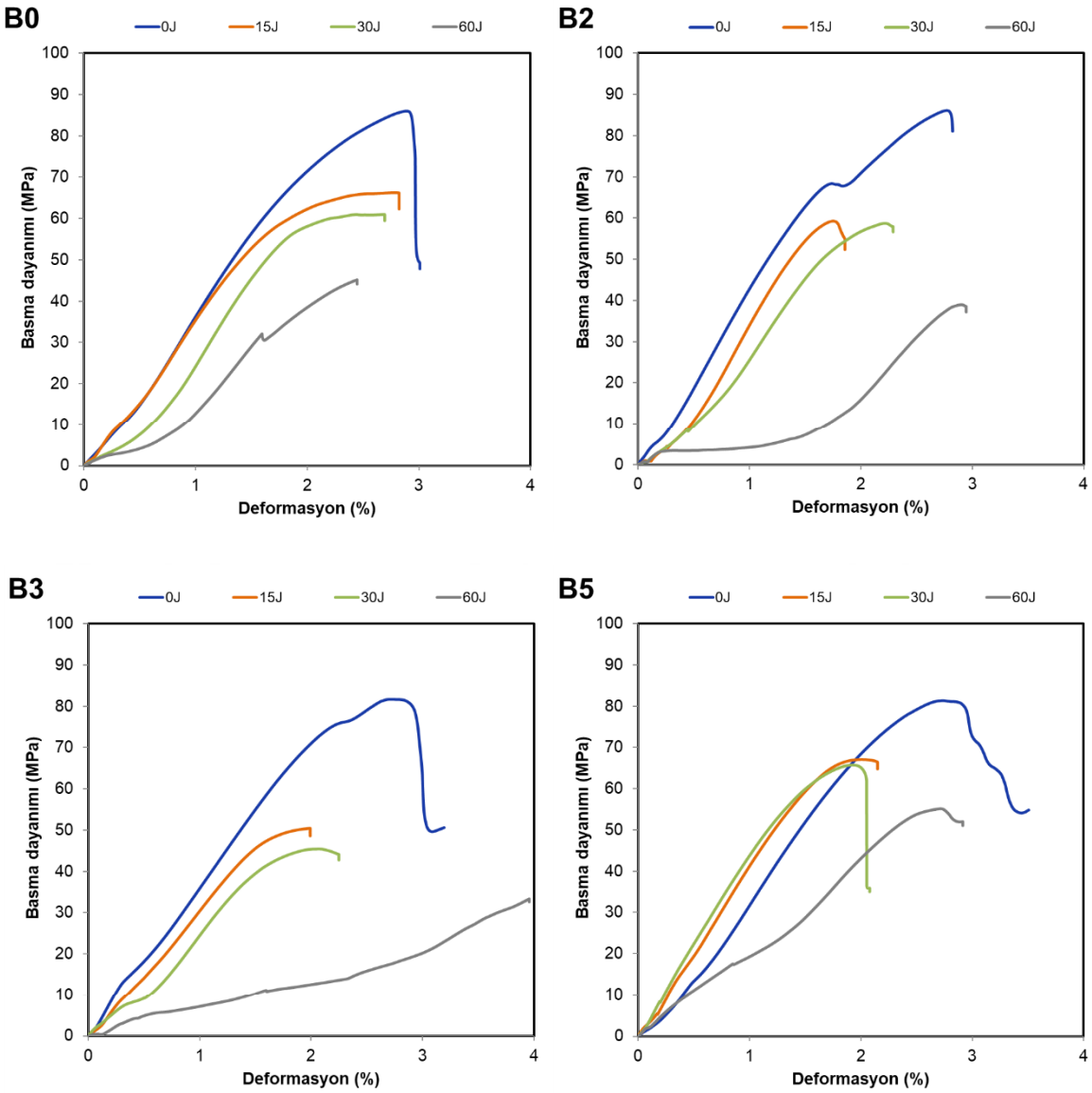
Darbe enerjisi arttıkça, hem bağlantısız 2D dokuma kompozitlerin (B0), hem de çok katlı 3D dokuma kompozitlerin (B2, B3 ve B5) CAI dayanım ve modülleri düşmüştür. Darbe yüküne maruz kalan kompozit yapılarda, en yüksek CAI dayanım ve modülünü B5 kompozit yapı gösterirken, bu yapıyı B0 kompozit yapı takip etmiştir. En düşük CAI deformasyonunu, en fazla katlararası bağlantıya sahip B2 kompozit yapı göstermiştir.

Çok katlı 3D dokuma kompozitlerde, katlararası bağlantı sayısı arttıkça, CAI deformasyonunun düştüğü ve yapının rijitleştiği görülmüştür. Bu durumun, krimp oranlarıyla bağlantılı olduğu düşünülmektedir.

B0 yapısının katlararası bağlantı ipliklerinin olmaması, yapının CAI dayanımının B5 yapıya kıyasla bir miktar düşmesine neden olmuştur. Ancak, B2 ve B3 gibi yapının z yönündeki artan bağlantı sayısı ise, artan oranda krimp ile birlikte kompozit yapıların CAI dayanımlarında düşüşe neden olmuştur (Hang ve ark., 2021). Burada, hem yapının z yönünde bağlantı ipliklerine sahip olan, hem de bağlantı sayısının daha az olmasından dolayı düşük krimp oranlarına sahip B5 kompozit yapının optimum basma ve CAI sonuçları verdiği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.10. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin basma ve CAI testi sonuçları.



Şekil 4.11. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin basma ve CAI testi dayanım-deformasyon eğrileri.

Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin, 15J, 30J ve 60J enerjilerdeki darbe testi sonrasındaki CAI dayanımları ve basma dayanımları (0J) dikkate alınarak hesaplanan 'Residual CAI dayanımı' Çizelge 4.6 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. 15J, 30J ve 60J enerji seviyelerinin tümünde, en yüksek residual CAI dayanımını, B5 çok katlı 3D dokuma kompozit yapı göstermiştir. Bu yapıyı, bağlantısız 2D dokuma kompozit takip etmiştir.

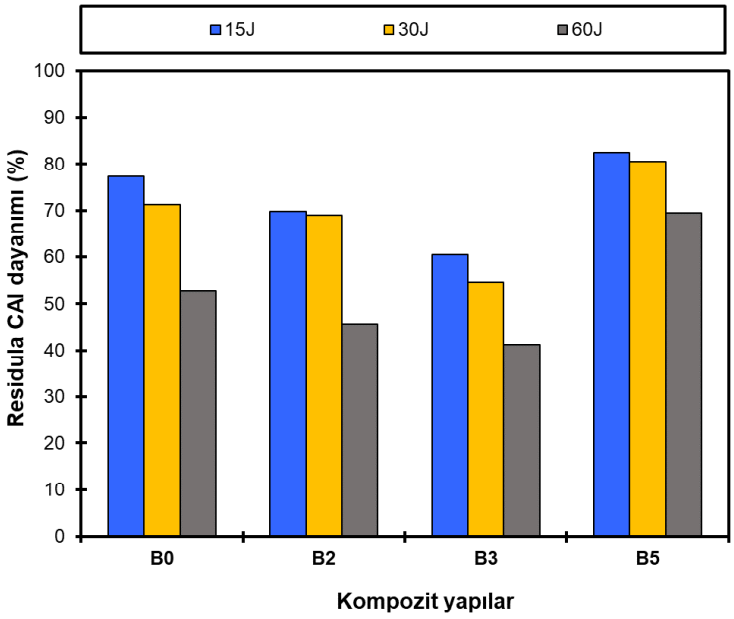
15J enerji seviyesinde, B5 kompozit yapı basma dayanımından sadece %17 kaybederken, B0 kompozit yapı %23, B2 kompozit yapı %30 ve B3 kompozit yapı ise %39 kaybetmiştir. 30J enerji seviyesinde, B5 kompozit yapı basma dayanımından sadece %19 kaybederken, B0 kompozit yapı %29, B2 kompozit yapı %31 ve B3 kompozit yapı

ise %45 kaybetmiştir. 60J enerji seviyesinde, B5 kompozit yapı basma dayanımından sadece %31 kaybederken, B0 kompozit yapı %47, B2 kompozit yapı %54 ve B3 kompozit yapı ise %59 kaybetmiştir.

B0 yapısının katlararası bağlantı ipliklerinin olmaması, yapının residual CAI dayanımının B5 yapıya kıyasla bir miktar düşmesine neden olmuştur. Ancak, B2 ve B3 gibi yapının z yönündeki artan bağlantı sayısı ise, artan oranda krimp ile birlikte kompozit yapıların residual CAI dayanımlarında düşüşe neden olmuştur. Burada, hem yapının z yönünde bağlantı ipliklerine sahip olan, hem de bağlantı sayısının daha az olmasından dolayı düşük krimp oranlarına sahip B5 kompozit yapının optimum residual CAI sonuçları verdiği değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.6. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin CAI ve residual CAI dayanımları.

Kompozit kodu	Darbe enerjisi	Basma ve CAI dayanımı (MPa)	Residual CAI dayanımı (%)	Darbe testi bozunan alan (mm^2)
B0	0J	86,28	-	-
	15J	66,64	77	247,82
	30J	61,44	71	552,63
	60J	45,65	53	673,02
B2	0J	85,81	-	-
	15J	59,86	70	515,73
	30J	59,17	69	696,50
	60J	39,24	46	847,05
B3	0J	83,75	-	-
	15J	50,68	61	260,79
	30J	45,78	55	296,24
	60J	34,57	41	858,57
B5	0J	81,86	-	-
	15J	67,56	83	379,41
	30J	65,99	81	538,84
	60J	56,82	69	527,48



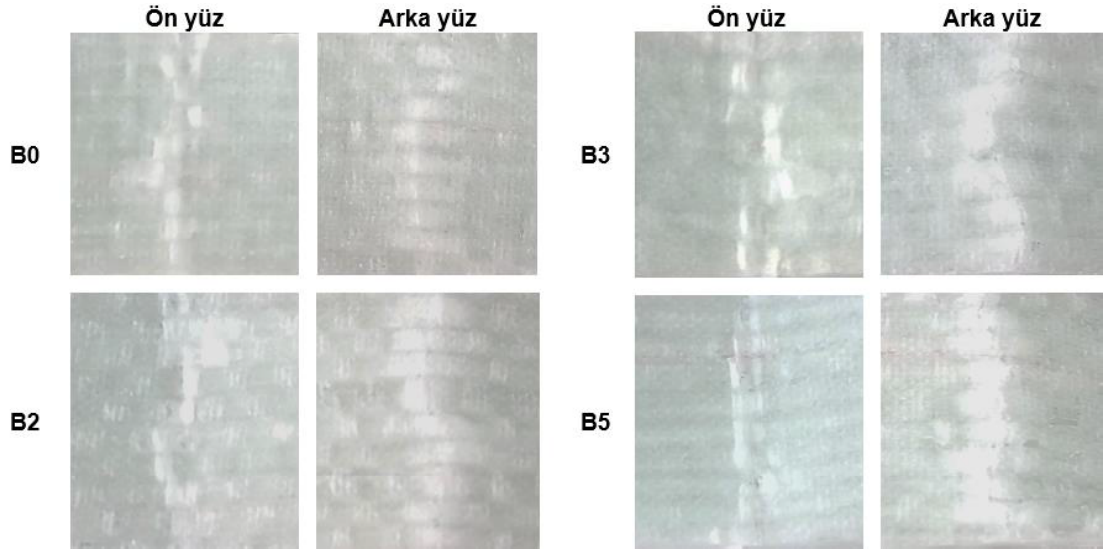
Şekil 4.12. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin residual CAI dayanımları.

4.6. Hasar Analizi Sonuçları

4.6.1. Eğme Testi Sonrası Hasar Analizi

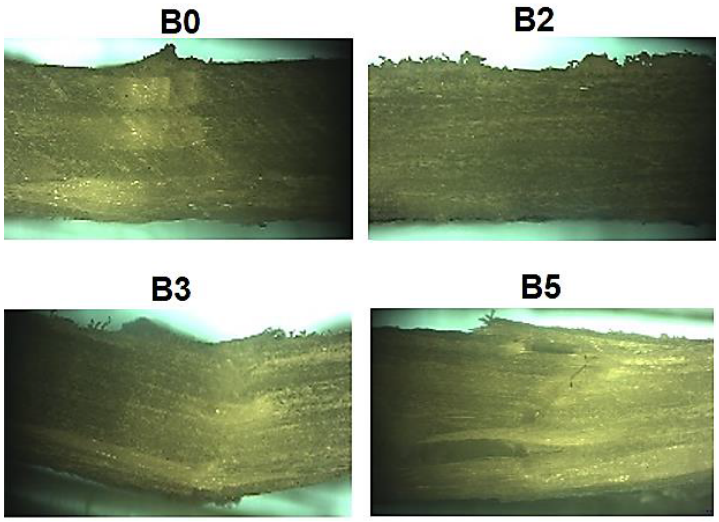
Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin eğme testi sonrası hasar analizleri, hem dijital fotoğraflar hem de mikroskobik kesit görüntüleri üzerinden yapılmıştır. Şekil 4.13'te, çok katlı 3D dokuma kompozitlerin eğme testi sonrası ön yüz ve arka yüz dijital görüntüleri verilmiştir. Ön yüz ve arka yüz görüntüleri incelendiğinde, B2 kompozit yapının eğme yükü altında daha sınırlı bir bozunma gösterdiği belirlenmiştir. B5 kompozit yapıdaki opak görüntü, hasarın yayıldığını göstermektedir.

Bağlantısız 2D dokuma kompozit yapının (B0) eğme yükü altındaki kırılma davranışı, çok katlı 3D dokuma kompozitlerden farklı olarak daha düz bir yol üzerinde gerçekleşirken, çok katlı 3D dokuma kompozitlerdeki kırılmada zig-zag bir yol üzerinde kırılma gerçekleşmiştir. Bu durum, çok katlı 3D dokuma kompozitlerde katlararasındaki bağlantı ipliklerinim (z lifi) köprüleme yaparak, çatlağın ilerlemesini önleme davranışına dayanmaktadır (Tong ve ark., 2002).



Şekil 4.13. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin eğme testi sonrası ön yüz ve arka yüz dijital görüntüleri.

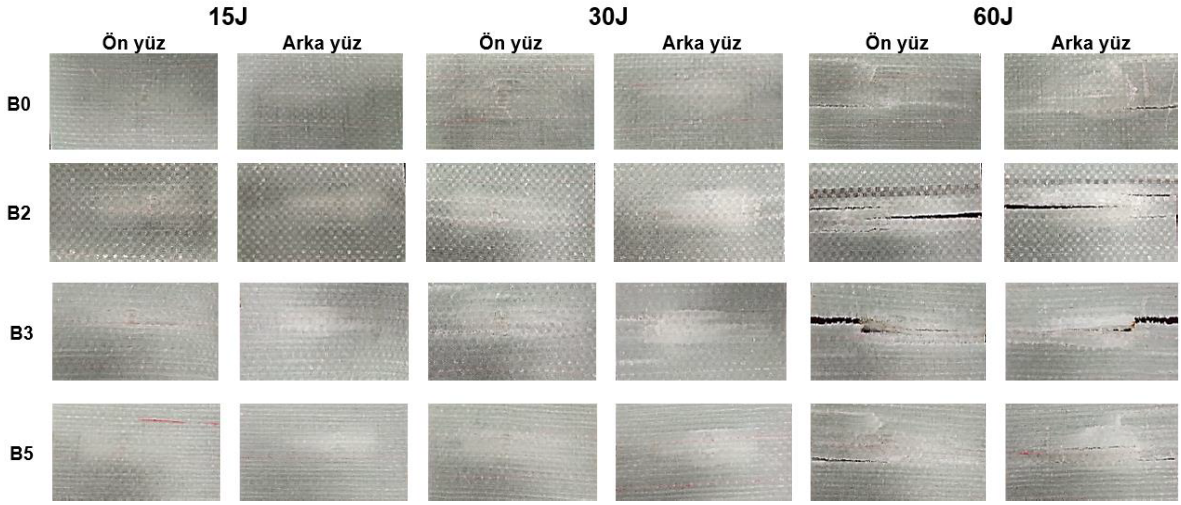
Şekil 4.14'te ise, çok katlı 3D dokuma kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskobik kesit görüntüleri verilmiştir. Kesit görüntüleri incelendiğinde, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin (B2, B3 ve B5) eğme yükü altında gerçekleşen hasarlarının, bağlantısız B0 yapısına göre daha lokalize olduğu görülmektedir. Katlararası bağlantı, hasarın yapının bütününe yayılmasını engelleyerek sınırlamaktadır. Ancak, sınırlanmış bölge içerisinde daha katastrofik bir kırılma gerçekleşmiştir. B0 kompozit yapıda ise mikro/makro delaminasyonlar gerçekleşmiştir.



Şekil 4.14. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin eğme testi sonrası mikroskobik kesit görüntüleri (×0.7 büyütme oranı).

4.6.2. Darbe Sonrası Hasar Analizi

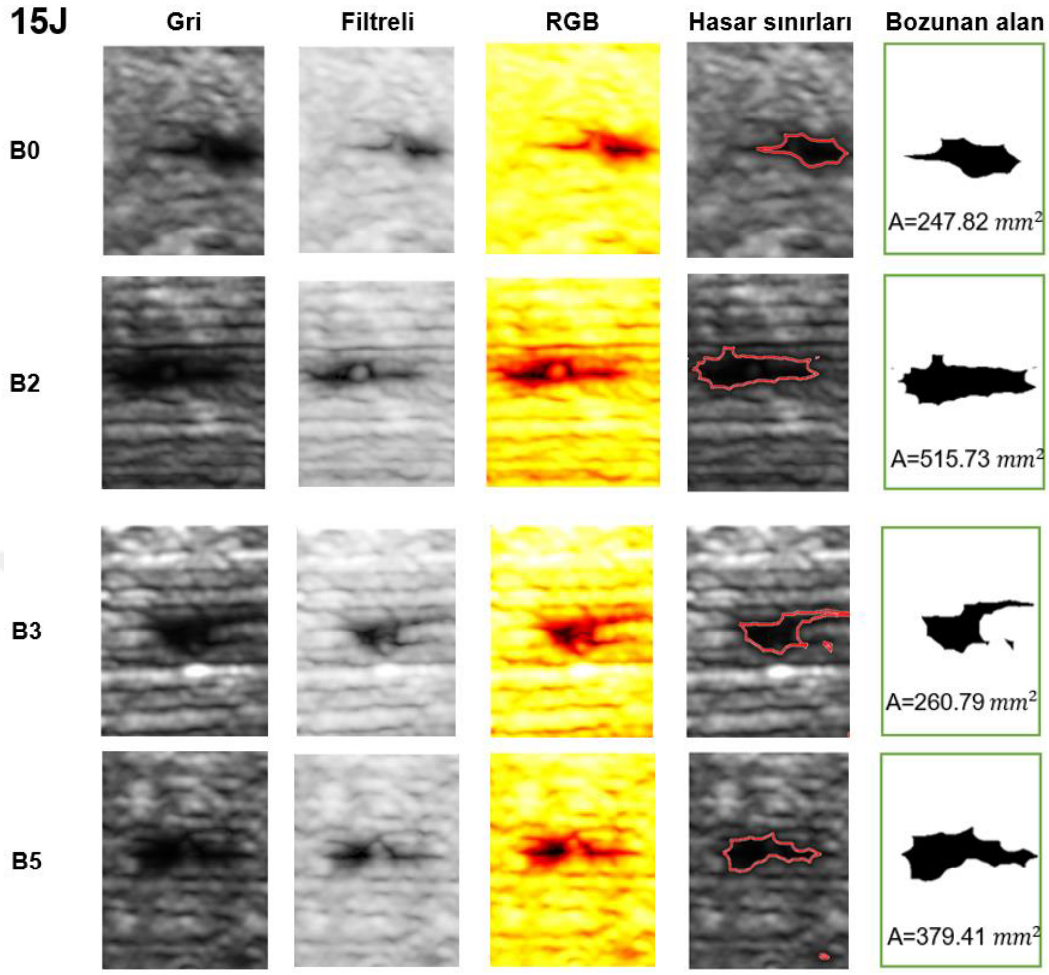
Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin darbe sonrası hasar analizleri, hem dijital fotoğraflar hem de Ultrasonik C-Scan görüntüleri üzerinden yapılmıştır. Şekil 4.15'te, çok katlı 3D dokuma kompozitlerin darbe sonrası dijital görüntüleri verilmiştir. Dijital görüntüler üzerinden yapılan incelemelerde, darbe test sonuçları ile uyumlu olarak, B2 ve B3 kompozit yapıların, aynı enerji seviyesinde, B0 ve B5 kompozit yapılara kıyasla daha fazla bozunma gösterdiği belirlenmiştir. B0 ve B5 kompozit yapılar ise, B2 ve B3 kompozit yapılara kıyasla daha az ve benzer bir bozunma göstermiştir.



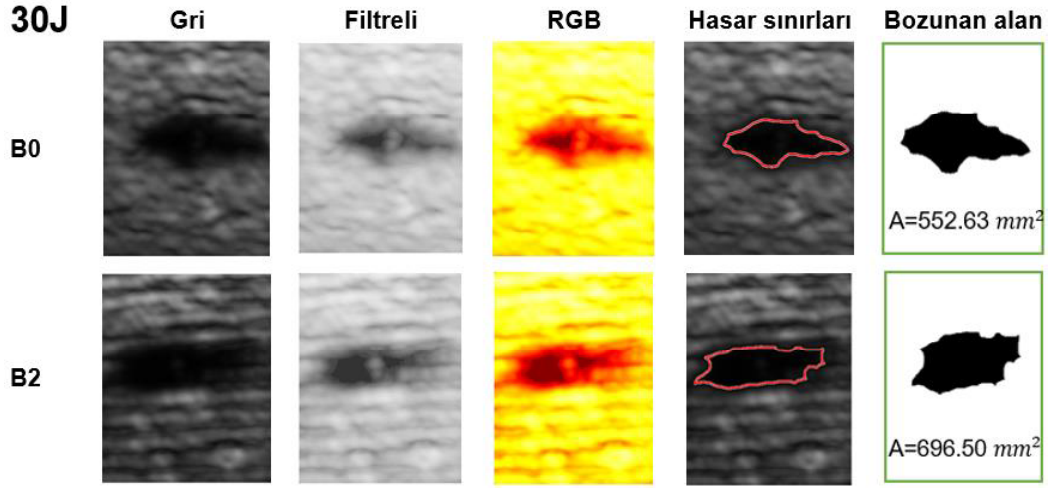
Şekil 4.15. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerin darbe testi sonrası dijital görüntüleri.

Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de sırasıyla, 15J, 30J ve 60J darbe enerjisine maruz kalan çok katlı 3D dokuma kompozitlerin Ultrasonik C-Scan görüntüleri ve bu görüntüler üzerinden hesaplanan bozunan alanları verilmiştir. Darbe enerjisi arttıkça, beklenildiği gibi bozunan alanlar da artmıştır.

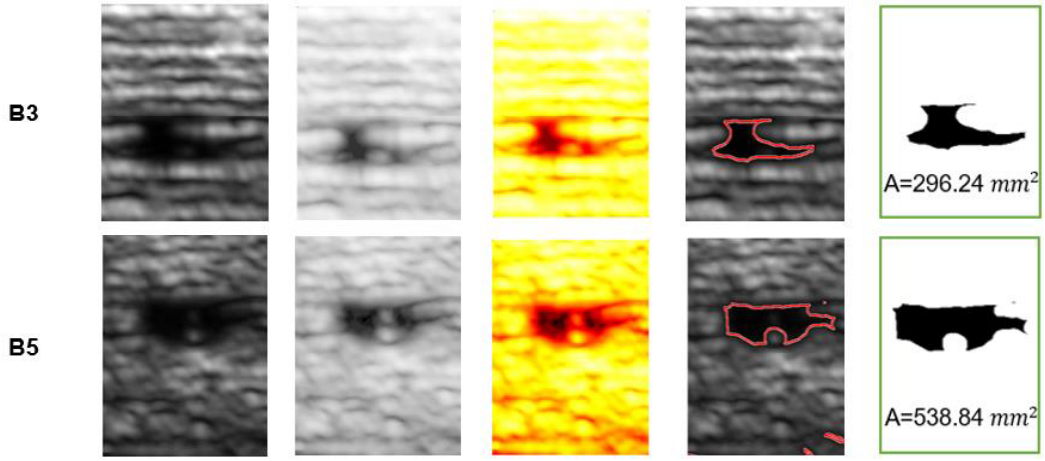
Düşük darbe enerjilerinde (15J ve 30J), çok katlı 3D dokuma kompozitlerin, bağlantısız 2D dokuma kompozitlere kıyasla daha düşük bozunma gösterdiği belirlenmiştir. Katmanlar arasındaki tokluk artışına neden olan, debonding, kırılma, pull-out ve özellikle z liflerinin çatlak köprülemesinden dolayı, darbe bölgesindeki delaminasyonun yayılması engellenerek bozunma azaltılmıştır (Tong ve ark., 2002; Saleh ve ark., 2019). 60J enerji seviyesinde ise, tüm kompozit yapılar kalıcı deformasyon göstermiş ve katastrofik lif/matris kırılmaları oluşmuştur. Bu nedenle, bozunan alanlarda herhangi bir eğilim bulunamamıştır. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerde, B3 kompozit yapının, hem 15J hem de 30J enerji seviyelerinde, B2 ve B5 kompozit yapılara kıyasla daha düşük bir bozunma alanı sergilediği belirlenmiştir.



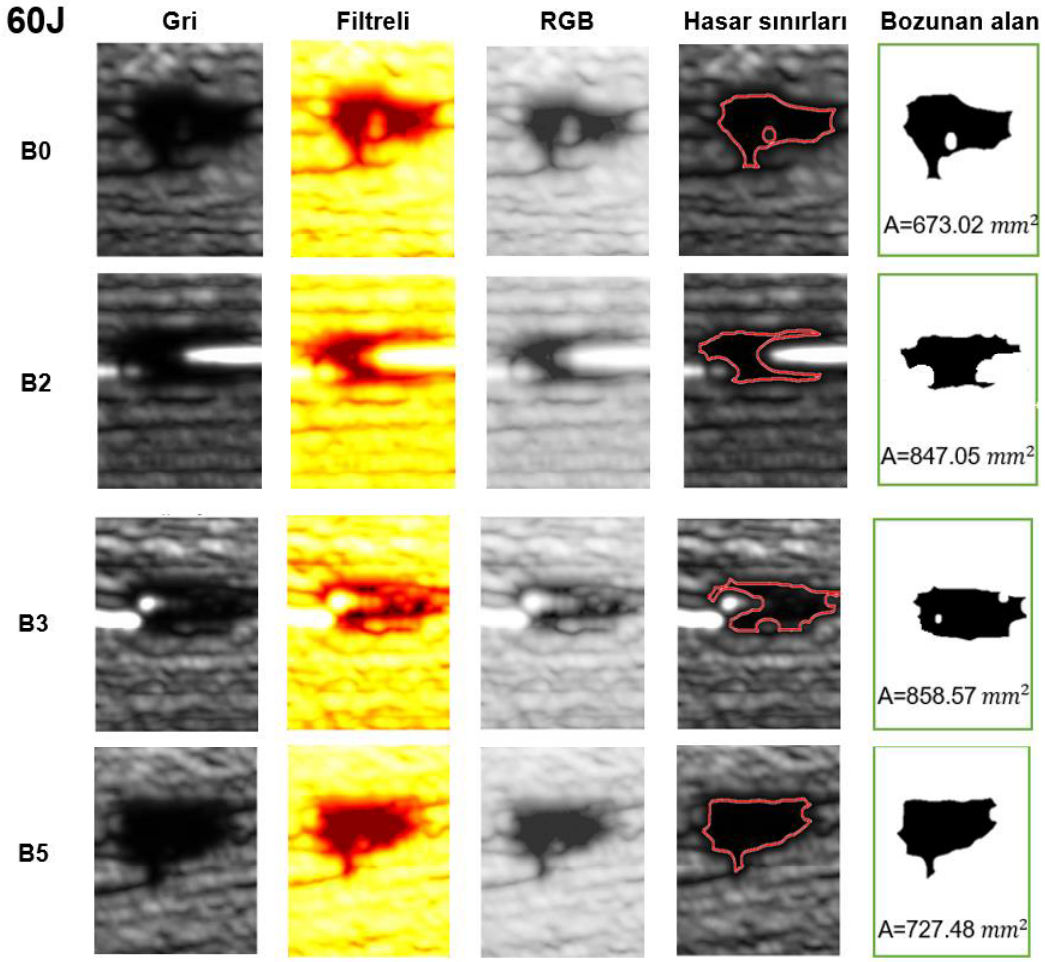
Şekil 4.16. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 15J darbe enerjisi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri.



Şekil 4.17. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 30J darbe enerjisi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri.



Şekil 4.17. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 30J darbe enerjisi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri (Devamı).



Şekil 4.18. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin 60J darbe enerjisi sonrası Ultrasonik C-Scan görüntüleri.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, tekstil yapısal kompozitlerde kullanılmak üzere çok katlı 3D hibrit dokuma preformlar geliştirilmiştir. Preformlar, bezayağı örgüsünde dört katlı ve üç farklı bağlantı tipinde (2/1, 3/1, 5/1) üretilmiştir. Çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin (B2, B3 ve B5) mekanik özellikleri, darbe dayanımları ve darbe sonrası hasar toleransları bağlantısız 2D hibrit dokuma kompozitler (B0) ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- Preformların atkı yönündeki krimp oranları, E-cam lifinin rijit yapısından dolayı çözgü yönüne kıyasla daha düşüktür. Katlararası bağlantı sayısının krimp oranlarını etkilediği sonucuna varılmıştır. B0 yapısının krimp oranları, beklenildiği gibi çok katlı 3D dokuma yapılara kıyasla daha düşüktür. En fazla katlararası bağlantı sayısının B2 yapısında olmasından dolayı, bu yapının krimp oranları, B3 ve B5 yapılarına göre daha yüksektir.
- Katlararası bağlantı sayısı arttıkça, çok katlı 3D hibrit dokuma preformlardaki lif miktarı ve kompozit yoğunlukları genel olarak artış göstermiştir. Kompozit yapılardaki E-cam lif miktarı arttıkça, kompozit yoğunlukları da artış göstermiştir.
- En yüksek eğme dayanımı ve modülünü, katlararası bağlantı sayısı en fazla olan kompozit yapı (B2) göstermiştir. Katlararası bağlantı sayısının fazla olmasının, yapıyı daha kompakt bir hale getirerek, eğme yüküne karşı direncini arttırdığı belirlenmiştir.
- Bağlantısız 2D dokuma kompozitlerin (B0) eğme dayanım ve modülünün, katlararası bağlantı sayısı az olan çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerle (B3, B5) benzerlik gösterdiği görülmüştür. Ancak, eğme testi sonrası kompozit kesit görüntüleri incelendiğinde, çok katlı 3D dokuma kompozitlerin eğme yükü altında gerçekleşen hasarlarının, bağlantısız 2D dokuma kompozitlere kıyasla daha lokalize olduğu belirlenmiştir.
- Darbe testi sonuçları değerlendirildiğinde, çok katlı 3D dokuma B5 kompozit yapının, diğer çok katlı 3D dokuma kompozitler (B2 ve B3) ve bağlantısız 2D dokuma kompozit yapıya (B0) kıyasla, her üç enerji seviyesinde de (15J, 30J ve 60J), daha yüksek darbe dayanım kuvvetine sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, bağlantısız 2D dokuma yapıda dört katmanının birbiri üzerine yerleştirilmesi, 3D dokuma kompozitlerde ise yapının z yönünde lif varlığından dolayı daha entegre bir yapı olmasıdır (Zhang ve ark., 2013).

- Çok katlı 3D dokuma kompozitlerde, katlararası bağlantı sayısı arttıkça, darbe dayanım kuvvetinin düştüğü belirlenmiştir. Bu durumun, yapıların krimp oranlarıyla bağlantılı olduğu düşünülmektedir (Hang ve ark., 2021).
- Çok katlı 3D dokuma kompozitler arasında, 60J enerji seviyesinde, en yüksek darbe dayanımı ve enerji absorpsiyonunu, en düşük deformasyonla sergileyen kompozit yapı B5 olarak belirlenmiştir. Düşük katlararası bağlantı sayısındaki çok katlı 3D dokuma kompozitlerin, bağlantısız 2D kompozit yapılara kıyasla darbe dayanımının daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu da, 3D kompozit yapıların darbe dayanımı gerektiren uygulama alanlarında daha üstün ve tercih edilebilir olduğunu göstermektedir (Behera ve Dash, 2015).
- Darbe enerjisi arttıkça, beklenildiği gibi bozunan alanlar da artmıştır. Düşük darbe enerjilerinde (15J ve 30J), çok katlı 3D dokuma kompozitlerin, bağlantısız 2D dokuma kompozitlere kıyasla daha düşük bozunma gösterdiği belirlenmiştir. Katmanlar arasındaki tokluk artışına neden olan, debonding, kırılma, pull-out ve özellikle z liflerinin çatlak köprülemesinden dolayı, darbe bölgesindeki delaminasyonun yayılması engellenerek bozunma azaltılmıştır (Tong ve ark., 2002; Saleh ve ark., 2019).
- Bağlantısız 2D dokuma (B0) ve çok katlı 3D dokuma (B2, B3 ve B5) kompozit yapıların basma dayanımları arasında büyük bir farklılık bulunmamakla birlikte, çok katlı 3D dokuma kompozitlerin basma modüllerinin, bağlantısız 2D dokuma kompozitlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Çok katlı 3D dokuma kompozitlerde, katlararası bağlantı sayısı arttıkça, basma modülünün arttığı belirlenmiştir. En yüksek basma deformasyonunu bağlantısız 2D dokuma kompozitler gösterirken, bu yapıyı katlararası bağlantı sayısı düşük B5 kompozit yapı takip etmiştir. Katlararası bağlantı sayısı arttıkça, basma deformasyonunun düştüğü ve yapının rijitleştiği görülmüştür.
- Darbe enerjisi arttıkça, hem bağlantısız 2D dokuma kompozitlerin (B0), hem de çok katlı 3D dokuma kompozitlerin (B2, B3 ve B5) CAI dayanım ve modülleri düşmüştür.
- Darbe yüküne maruz kalan kompozit yapılarda, en yüksek CAI dayanım ve modülünü B5 kompozit yapı gösterirken, bu yapıyı B0 kompozit yapı takip etmiştir. En düşük CAI deformasyonunu, en fazla katlararası bağlantıya sahip B2 kompozit yapı göstermiştir.

- 15J, 30J ve 60J enerji seviyelerinin tümünde, en yüksek residual CAI dayanımını, B5 çok katlı 3D dokuma kompozit yapı göstermiştir. Bu yapıyı, bağlantısız 2D dokuma kompozit takip etmiştir.
- B0 yapısının katlararası bağlantı ipliklerinin olmaması, yapının residual CAI dayanımının B5 yapıya kıyasla bir miktar düşmesine neden olmuştur. Ancak, B2 ve B3 gibi yapının z yönündeki artan bağlantı sayısı ise, artan oranda krimp ile birlikte kompozit yapıların residual CAI dayanımlarında düşüşe neden olmuştur. Burada, hem yapının z yönünde bağlantı ipliklerine sahip olan, hem de bağlantı sayısının daha az olmasından dolayı düşük krimp oranlarına sahip B5 kompozit yapının optimum residual CAI sonuçları verdiği değerlendirilmiştir.
- Katlararası bağlantının, hasarın yapının bütününe yayılmasını engelleyerek sınırladığı, bu sayede yapı bütünlüğünün korunmasına katkı sağlayacak bir yöntem olarak geliştirilen çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitlerin, havacılık ve savunma sanayine yönelik hasar toleranslı malzeme gereksinimine sahip kullanım alanları için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, çok katlı 3D hibrit dokuma kompozitler geliştirilerek, mekanik ve darbe dayanımları bağlantısız 2D dokuma kompozitler ile kıyaslanarak detaylı olarak incelenmiştir. Özellikle, katlararası bağlantı sayısının, 3D dokuma kompozit yapıların hem mekanik özellikleri, hem de darbe dayanımı ve hasar eğilimlerini belirleyici bir unsur olduğu ortaya çıkmıştır. İleriki çalışmalarda, farklı dokuma konstrüksiyonları ve liflerin kullanımının, çok katlı 3D dokuma kompozitlerin performanslarına etkisinin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılması önerilebilir.

KAYNAKLAR

Abildskov, D. (1996). U.S. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Patent No. 5,533,693.

Addis, S. R. (1998). U.S. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. Patent No. 5,775,381.

Anahara, M., Y. Yasui and H. Omori, (1991). Three-dimensional textile and method of producing the same, European Patent No. 0-426-878-A1.

Ansar, M., Xinwei, W., Chouwei, Z. (2011). Modeling strategies of 3D woven composites: A review. *Composite structures*, 93(8), 1947-1963.

Behera, B. A., Dash, B. P. (2015). Mechanical behavior of 3D woven composites. *Materials and design,* 67, 261-271.

Bannister, M., Herszberg, I., Nicolaidis, A., Coman, F., Leong, K.H., (1998), The manufacture of glass/epoxy composites with multilayer woven architectures. *Composites Part A*, 29A:293-300.

Bilisik, K. (2009). New method of weaving multiaxis three dimensional flat woven fabric: feasibility of prototype tube carrier weaving. *Fibre Text East Eur*, 17(6), 63-69.

Bilisik, K. (2011). Multiaxis three dimensional (3D) woven fabric. *Advances in modern woven fabrics technology*, 79-106.

Curiskis, J.I., Durie, A., Nicolaidis, A., Herszberg, I. (1997). Developments in multiaxial weaving for advanced composite materials. *In Proceedings of the 11th International Conference on Composite Materials: Textile Composites and Characterisation* (Vol. 5, p. 86). Woodhead Publishing.

Dahale, M., Neale, G., Lupicini, R., Cascone, L., McGarrigle, C., Kellya, J., Archer, E., Harkin-Jones, E., McIlhagger, A. (2019). Effect of weave parameters on the mechanical properties of 3D woven glass composites. *Composite Structure*, 223, (2019), 110947.

Dai, S., Cunningham, P. R., Marshall, S., Silva, C. (2015). Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, 195-207.

De Carvalho, N. V., Pinho, S. T., & Robinson, P. (2012). Analytical modelling of the compressive and tensile response of woven composites. *Composite Structures*, 94(9), 2724-2735.

Dehkordi, M. T., Nosraty, H., Shokrieh, M. M., Minak, G., & Ghelli, D. (2010). Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics. *Materials and Design*, 31(8), 3835-3844.

Dhiman, S., Potluri, P., Silva, C. (2015). Influence of binder configuration on 3D woven composites. *Composite Structures*, 134, 862-868.

Dong, C., Ranaweera-Jayawardena, H. A., Davies, I. J. (2012). Flexural properties of hybrid composites reinforced by S-2 glass and T700S carbon fibres. *Composites Part B: Engineering,* 43(2), 573-581.

Ewert, A., Drach, B., Vasylevskyi, K., Tsukrov, I. (2020). Predicting the overall response of an orthogonal 3D woven composite using simulated and tomography-derived geometry. *Composite Structures*, 243, 112169.

Fan W., Dang W., Liu T., Li J., Xue L., Yuan L., Dong J. (2019). Fatigue behavior of the 3D orthogonal carbon/glass fibers hybrid composite under three-point bending load. *Materials and Design*, 183, (2019), 108112.

Farley, G. L. (1993). U.S. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. *Patent, No*. 5,224,519.

Fukuta, K., Miyashita, R., Sekiguti, J., Nagatsuka, Y., Tsuburaya, S., Aoki, E., Sasahara, M. (1974). U.S. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. *Patent, No*. 3,834,424.

Hallal, A., Younes, R., Fardoun, F., Nehme, S. (2012). Improved analytical model to predict the effective elastic properties of 2.5 D interlock woven fabrics composite. *Composite Structures*, 94(10), 3009-3028.

Hang, C., Cui, H., Liu, H., Suo, T. (2021). Micro/meso-scale damage analysis of a 2.5D woven composite including. *Composite Structures*, 256, (2021), 113067.

Hosur, M. V., Adbullah, M., Jeelani, S. (2005). Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites. *Composite Structures*, 67(3), 253-262.

Ishikawa, T., Chou, T. W. (1982). Elastic behavior of woven hybrid composites. *Journal of composite materials*, 16(1), 2-19.

Jiao, W., Chen, L., Xie, J., Yang, Z., Fang, J., Chen, L. (2020). Effect of weaving structures on the geometry variations and mechanical properties of 3D LTL woven composites. *Composite Structures*, 252, (2020), 112756.

Kekil, K., Kaya, G., 2021, Çok Katlı Üç Boyutlu (3D) Hibrit Dokuma Kompozitlerin Performanslarının İncelenmesi, *EJONS, 11th Internatıonal Conference on Mathematics, Engineering, Natural and Medical Sciences*, January 30-31, Karak, Jordan, 191-200.

Kimbara, M., Fukuta, K., Tsuzuki, M., Takahama, H., Santo, I., Hayashida, M., Machii, A. (1991). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. US Patent No. 5,076,330.

Ko, F.K., 1989, *Three-dimensional Fabrics for Composites*, In: Textile structural composites, Eds. Chou, T.W., Ko, F., Elsevier Science Publishers, 136-139.

Labanieh, A. R., Liu, Y., Vasiukov, D., Soulat, D., Panier, S. (2017). Influence of off-axis in-plane yarns on the mechanical properties of 3D composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 98, 45-57.

Madke, R. R., Chowdhury, R. (2019). A multiscale continuum model for inelastic behavior of woven composite. *Composite Structures*, 226, 111267.

Mahadik, Y., Hallett, S. R. (2011). Effect of fabric compaction and yarn waviness on 3D woven composite compressive properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(11), 1592-1600.

Miao, H., Wua, Z., Yinga, Z., Hua, X. (2019). The numerical and experimental investigation on low-velocity impact response of composite panels: Effect of fabric architecture. *Composite Structures*, 227, (2019), 111343.

Mohamed, M. H., Bilisik, A. K. (1995). U.S. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. *Patent, No*. 5,465,760.

Mohamed, M. H., Zhang, Z., & Dickinson, L. (1988, January). Manufacture of multi-layer woven preforms. In *ASME Winter Annual Meeting*.

Munoz, R., Martinez, V., Sket, F., Gonzalez, C., LLorca, J. (2014). Mechanical behavior and failure micromechanisms of hybrid 3D woven composites in tension. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 59, 93-104.

Naik, N. K., Shembekar, P. S. (1992). Elastic behavior of woven fabric composites: I—Lamina analysis. *Journal of composite materials*, 26(15), 2196-2225.

Nayak S. Y., Satish S. B., Sultan M. T. H., Kini C. R., Shenoy K. R., Samant R., Sarvade P. P., Basri A. A., Mustapha F. (2020). Influence of fabric orientation and compression factor on the mechanical properties of 3D E-glass reinforced epoxy composites. *Journal of Materials of Research Tecnology*, (2020), 9(4):8517–8527.

Pandya, K. S., Veerraju, C., Naik, N. K. (2011). Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading. *Materials and Design*, 32(7), 4094-4099.

Pankow M., Justusson B., Riosbaas M., Waas A. M., Yen C. F. (2019). Effect of fiber architecture on tensile fracture of 3D woven textile composites. *Composite Structures,* 225, (2019), 111139.

Ruzand, J. M., Guenot, G. (1994). Multiaxial three-dimensional fabric and process for its manufacture. *International patent WO*, 94(20658), 15.

Saleh M.S., El-Dessouky H. M., Saeedifar M., De Freitas S. T., Scafie R. J., Dimitrios Z. (2019). Compression after multiple low velocity impacts of NCF, 2D and 3D woven composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, (2019), 105576.

Scida, D., Aboura, Z., Benzeggagh, M. L., Bocherens, E. (1998). Prediction of the elastic behaviour of hybrid and non-hybrid woven composites. *Composites science and technology*, 57(12), 1727-1740.

Seltzer, R., Gonzalez, C., Munoz, R., LLorca, J., Blanco-Varela, T. (2013). X-ray microtomography analysis of the damage micromechanisms in 3D woven composites under low-velocity impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 45, 49-60.

Shekar, R. I., Kotresh, T. M., Prasad, A. K., Rao, P. D., Kumar, M. S. (2010). Hybrid fiber fabric composites from poly ether ether ketone and glass fiber. *Journal of applied polymer science*, 117(3), 1446-1459.

Stig, F., Hallström, S. (2013). Influence of crimp on 3D-woven fibre reinforced composites. *Composite Structures*, 95, (2013), 114–122.

Sudarisman, Davies, I. J. (2008). Flexural failure of unidirectional hybrid fibre-reinforced polymer (FRP) composites containing different grades of glass fibre. *Advanced Materials Research*, 41, 357-362.

Tableau, N., Aboura, Z., Khellil, K., Laurin, F., Schneider, J. (2019). Multiaxial loading on a 3D woven carbon fiber reinforced plastic composite using tensile-torsion tests: Identification of the first damage envelope and associated damage mechanisms. *Composite Structures*, 227, 111305.

Tong, L., Mouritz, A. P., Bannister, M. K. (2002). 3D fibre reinforced polymer composites. *Elsevier.*

Ullah, H., Harland, A. R., Silberschmidt, V. V. (2015). Characterisation of mechanical behaviour and damage analysis of 2D woven composites under bending. *Composites Part B*: *Engineering,* 75, 156-166.

Ünal, P. G. (2012). 3D Woven Fabrics, chapter in: Woven Fabrics edited by Han-Yong Jeon. *InTech, Rijeka, Croatia*, 91-120.

Whitcomb, J. D. (1991). Three-dimensional stress analysis of plain weave composites. *Composite materials: Fatigue and fracture.*, *3*, 417-438.

Wu Z., Zhang L., Ying Z., Ke J., Hu X. (2020). Low-velocity impact performance of hybrid 3D carbon/glass woven orthogonal composite: Experiment and simulation. *Composites Part B: Engineering*, 196, (2020), 108098.

Yamamoto, T., Nishiyama, S., Shinya, M. (1995). Study on weaving method for three-dimensional textile structural composites. In *Proceedings Of The Japan International Sampe Symposium* (Vol. 1, pp. 655-660). Japan Chapter Of Sampe.

Zhang, D., Sun, Y., Chen, L., Pan, N. (2013). A comparative study on low-velocity impact response of fabric composite laminates. *Materials and Design*, *50*, 750-756.

Zhang D., Sun M., Liu X., Hiao X., Oian K. (2019). Off-axis bending behaviors and failure characterization of 3D woven Composites. *Composite Structures*, 208, (2019) 45–55.

Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., Wang, C. H. (2012). Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. *Materials and Design (1980-2015)*, *36*, 75-80.

Zhou, W., Wente, T., Liu, D., Mao, X., Zeng, D., Torab, H., Dahl, J., Xiao, X. (2020). A comparative study of a quasi 3D woven composite with UD and 2D woven laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 139, 106139.