

KOMPOZİT LAMİNALAR İÇERİSİNDE YAŞANAN BOZULMALAR KAYNAKLI MEKANİK ÖZELLİK DEĞİŞİMLERİNİN BELİRLENMESİ

PREPARED/EDITED BY

Erkin Barış Güngör
Kd. Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih: 11/01/2023

GİRİŞ

Kompozit laminaların mekanik özellikleri üretim şartlarına bağlı olarak değişmekte ve üretim sırasında malzeme yapısı içerisinde oluşan bozulmalar, mekanik özellikleri ciddi şekilde etkileyebilmektedir. Üretimlerinin maliyeti ve süresi düşünülecek olur ise, kompozit laminalardan üretilmiş parçaların bu bozulmalar kaynaklı hurdaya ayrılması üreticiye yük oluşturabilmektedir.

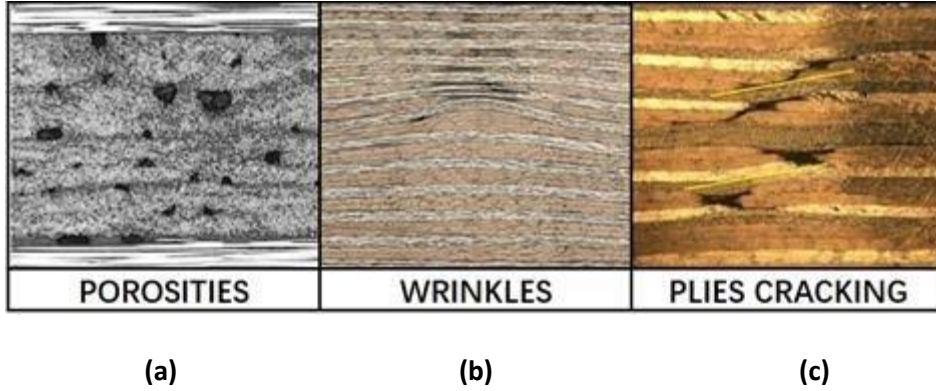
Benzer şekilde, üretimde kullanılan kompozit yapıların mekanik özelliklerini belirlemek için yapılmış olan test kampanyaları sonrası, zamanla değişime uğrayabilen üretim parametrelerine bağlı olarak değişen mekanik özellikleri tekrar yeni test kampanyaları ile belirlemek yüksek maliyetler oluşturmaktadır. Bu sebeple yaşanan değişimlerin etkisini öngörebilmek kritik bir mühendislik problemidir. Digimat VA, kompozit testlerin, sanal testlerle desteklenmesinin yanı sıra, bu bozulmalardan oluşabilecek belirsizlikleri öngörebilecek bir çözüm sunar.

KOMPOZİTLER İÇERİSİNDE YAŞANABİLECEK BOZULMALAR

Kompozit laminaların üretimi sırasında yaşanabilecek bozulmalar başlıca;

- Epoksi resinin her bölgeye eşit bir şekilde dağılamaması sebebiyle katmanlar arası veya katman içi boşluklar,
- Yapışma sırasında yaşanan bozulmalar sebebiyle oluşan delaminasyon bölgeleri,
- Kumaşların serimi sırasında yaşanmış şekil bozulmaları kaynaklı kabaran bölgeler,

Olmaktadır (Şekil 1). Bozulma miktarı, üretimi gerçekleştiren ustaların el melekeseine, üretilecek parçaların şekline ve kalıp yapılarına kadar birçok değişkene bağlıdır.



ŞEKİL 1 BOZULMA TIPLERİ (A) BOŞLUKLAR (B) BURULMALAR (C) KATMAN DEVAMSIZLIKLARI

Kompozit ürünler genel olarak yekpare büyük yapılar şeklinde oluşturulabildikleri için avantajlıdır. Ancak yukarıda bahsedilen bozulmalar, büyük ürünlerde yaşanacak olursa, zamansal ve maddi olarak şirketleri büyük zararlara uğratabilirler. Bu sebeple mühendisler, ürünleri hurdaya ayırmadan önce, bozulma görülen ürünlerin çalışabileceği koşulları belirlemeye ve ürünleri kullanmaya çalışırlar. Limitasyonlara tabi ürünlerin çalışabileceği koşulları belirlemek adına bozuk yapıların dayanımları hakkında bir öngörüye sahip olmak gereklidir.

Bütün bozulmalar için detaylı yapısal analizler gerçekleştirmek her zaman uygulanabilir olmamaktadır. Ayrıca yaşanan bozulmalar, üretimler arasında farklılıklar gösterebileceği için, kapsayıcı bir zarf içerisinde olasılıksal yöntemlerle değerlendirmeleri gerekebilir.

BELİRSİZLİK ANALİZLERİ

Digimat VA içerisinde belirli etkilere bağlı olarak, malzeme mekanik özelliklerinin değişimi iki ayrı şekilde hesaplanabilmektedir. Bunlardan birincisi; Parametrik çalışma (Parametric Study) yöntemidir. Bu yöntem ile serim işlemleri sonrasında, bazı mekanik özellikler için belirli değer aralıkları tanımlanır. Bu değer aralıkları, farklı test numunelerine karşılık gelir ve her bir test numunesi için farklı dayanım değerleri elde edilir.

Bu çalışmanın amacı, serim ve malzeme özelliklerine bağlı olan laminanın nihai özelliklerinin, hangi parametrelerin değişkenliğine karşı ne derece hassas olduğu hakkında bir öngörü elde edebilmektir.

Belirsiz bir durumun sınırlarını öngörebilmek adına geliştirilmiş olan Monte Carlo metodu ile, seçilmiş parametrelerin bulunabileceği olasılıksal dağılımlar analiz içerisine girdi olarak verilerek, nihai durumda bunların değişimine bağlı olarak yaşanacak dayanım değerlerindeki indirgenme faktörleri (Knock-Down Factor) hesaplanabilmektedir. Hesaplanan bu indirgenme faktörleri kullanılarak bozulmuş yapının ömür döngüsü içerisinde dayanımının ne derece değişeceği bilgisine ulaşılabilmektedir. Bu sayede olasılıksal bir probleme deterministik bir çözüm bulunmuş olmaktadır.

PARAMETRİK ÇALIŞMA (PARAMETRIC STUDY) – DIGIMAT VA

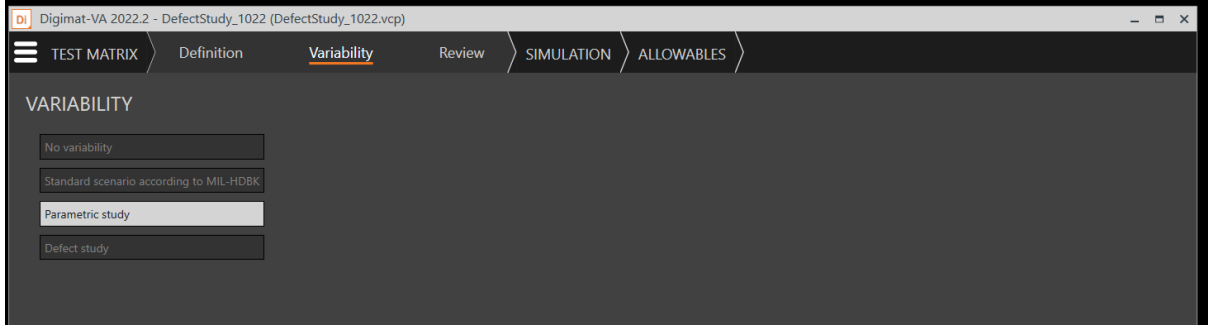
Digimat VA arayüzü içerisinde parametrik çalışma yöntemi seçilerek, öncelikle kompozit serim malzemelerinin özelliklerinin belirlenen aralıklar içerisinde değişken olduğu durumlar incelenir. Bu sayede, her bir parametre değerine denk gelen sonuçlar karşılaştırılabilmektedir. Bu çalışma içerisinde Digimat VA, kullanıcıya iki tip çözüm yöntemi sunmaktadır. Tek parametre matris (Single Parameter Matrix) yöntemi, belirlenmiş parametrelerin teker teker nihai dayanım ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya çıkarırken, tam çaprazlanmış matris (Full Cross Matrix) yöntemi ile bu parametrelerin farklı varyasyonlarının birbirleri ile etkileşimi sonucunda da ortaya çıkacak sonuçların öngörülmesini sağlamaktadır.

Parametrik çalışma yöntemi aşağıdaki değişkenler hakkında girdilerin yapılmasına olanak sağlamaktadır:

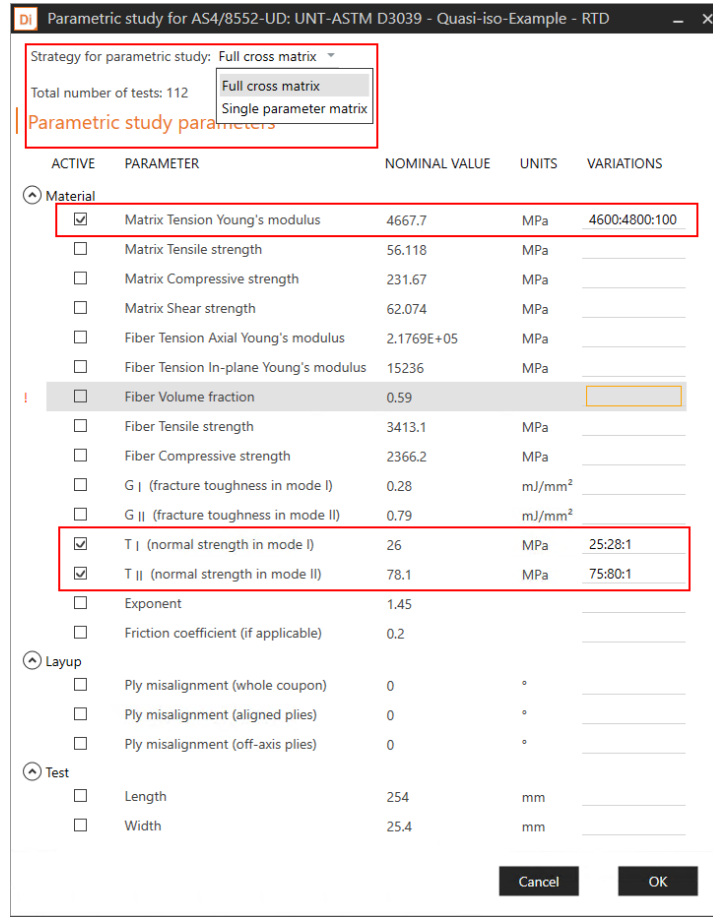
- **Malzeme parametreleri:** kullanıcı, malzemenin dayanım ve elastisite özelliklerindeki değişimin nihai mekanik özelliklere etkisini öngörebileceği gibi, aynı zamanda fiber oranı etkisinin de bu özelliklere etkisi hakkında bilgi sahibi olabilmektedir.
- **Serim parametreleri:** kullanıcı, serim içerisindeki açılmalarda etkisini görebileceği gibi, aynı zamanda farklı serim tipleri sonucunda oluşabilecek mekanik özellikler hakkında da bilgi sahibi olabilmektedir.
- **Test parametreleri:** eğer yapılan test ile alakalı bir değişim var ise (kupon genişliği veya uzunluğu, delik çapı vs.) bunların etkisi görülebilmektedir.

Bu yazı içerisinde öngörülen çalışma kapsamında, malzeme özelliklerindeki değişimlerin etkisi hakkındaki parametrik çalışma yöntemi incelenecektir. Parametrik çalışma içerisinde sunulan diğer yetenekler, kompozit üretimi içeren uygulamalar için birçok çalışmaya izin veriyor olsa da bu yazı kapsamının dışında kalmaktadır.

Parametrik çalışma VA arayüzü içerisinde test matrisi tanımlandıktan sonra seçilebilmektedir. Bu seçim sonrası analizin oluşturulmasına başlanabilir. Malzeme modeli içerisinde parametrik olarak işlenmesi istenen malzeme özellikleri seçilerek bunların değer değişimleri tanımlandıktan sonra analizler senaryoları oluşturulup koşturulabilmektedir. Parametreler: “Alt Sınır:Üst Sınır:Adım” şeklinde “:” ile adimsal olarak veya “;” kullanılarak belirli değerler için “Değer1;Değer2;Değer3” tanımlanabilmektedir. “Full-Cross Matrix” seçeneği seçilerek bu parametrelerin değişimlerinin kombinasyonları incelenebilmekte, ya da “Single-Parameter” yöntemi ile her bir parametredeki değişimin nihai dayanım özelliklerinde yarattığı değişim gözlemlenebilmektedir.



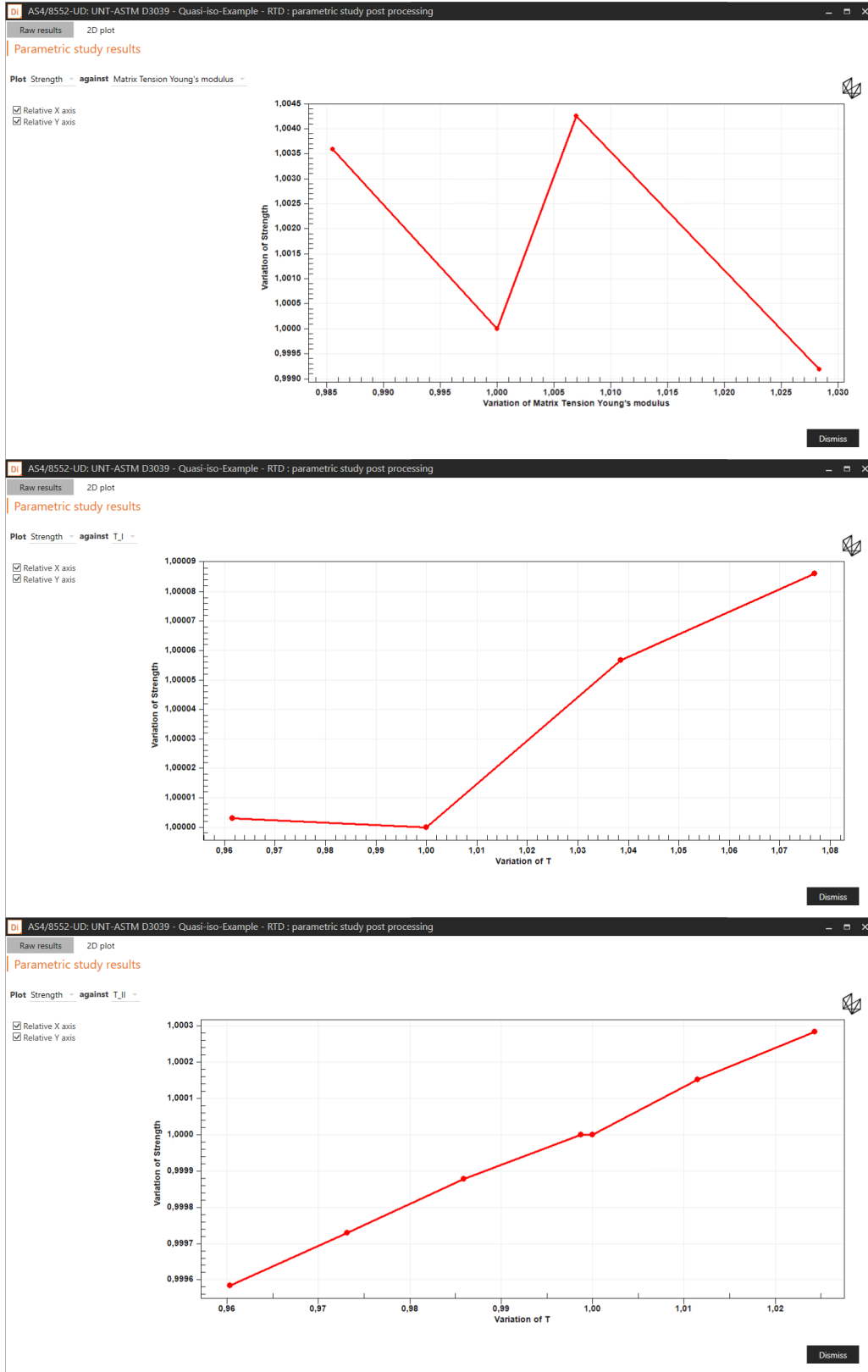
ŞEKİL 2 PARAMETRIC STUDY SEÇİM EKRANI



ŞEKİL 3 PARAMETRIK ÇALIŞMA TANIMLAMASI

Bu işlemler sonucunda incelenmesi istenen modeller oluşturulup, elde edilen sonuçlara göre dayanım ve elastisite gibi özelliklerdeki değişimlerin grafik çıktıları alınabilmektedir (Şekil 4).

Bu çalışma yöntemi ile üretim sırasında malzeme özellikleri üzerinde yaşanabilecek değişimlere karşı, dayanım gibi kritik mekanik özelliklerin nasıl değişebileceği öngörülebilir. Öngörülen bu değişimler bir zarf olarak değerlendirilip, dayanım kritikliği ve çalışma zarfı bu şekilde değerlendirilebilmektedir.

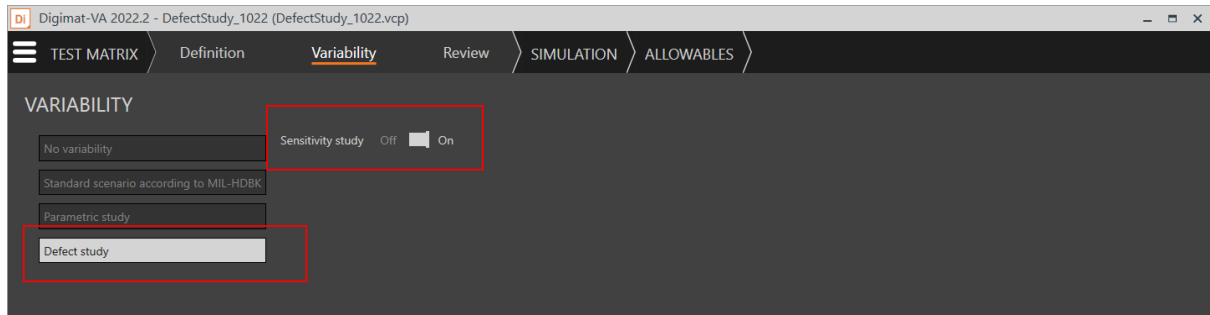


ŞEKİL 4 DAYANIMIN PARAMETRELERE GÖRE DEĞİŞİMİ (GRAFIKLER İLK DAYANIM DEĞERİNE ORANLI OLARAK ÇIZDIRILMIŞTIR)

DEFECT STUDY – DIGIMAT VA

Defect Study (Bozulma Çalışması) Digimat VA içerisinde üretilmiş ürünlerde yaşanan bozulmaların etkisinin gözlemlenebilen veya tahmin edilebilen zarflarda analizlere yansıtılarak, bu belirsizlikler içerisinde incelenmesini sağlamaktadır. Sunmuş olduğu pratik ara yüz sayesinde, çalışma hızlı bir şekilde sonuçlandırılarak, dayanım üzerindeki indirgenme faktörleri (Knock-Down Factor) hesaplanabilmektedir. “Knock-Down Factor” yüzde cinsinden tanımlanmakta olup, daha önceden malzemenin sahip olduğu dayanım üzerindeki indirgenmesini göstermektedir.

Bozulma Çalışması (Defect Study), “Test Matrix” menüsünde “Variability” adımıyla seçilebilmektedir. “Sensitivity Study” seçeneği açık şekilde devam edilecek olursa, tanımlanan bozulmalar sonucu oluşacak indirgenmeler parametrik çalışma içerisinde olduğu gibi her bir bozulma çeşidine göre hesaplanacaktır.

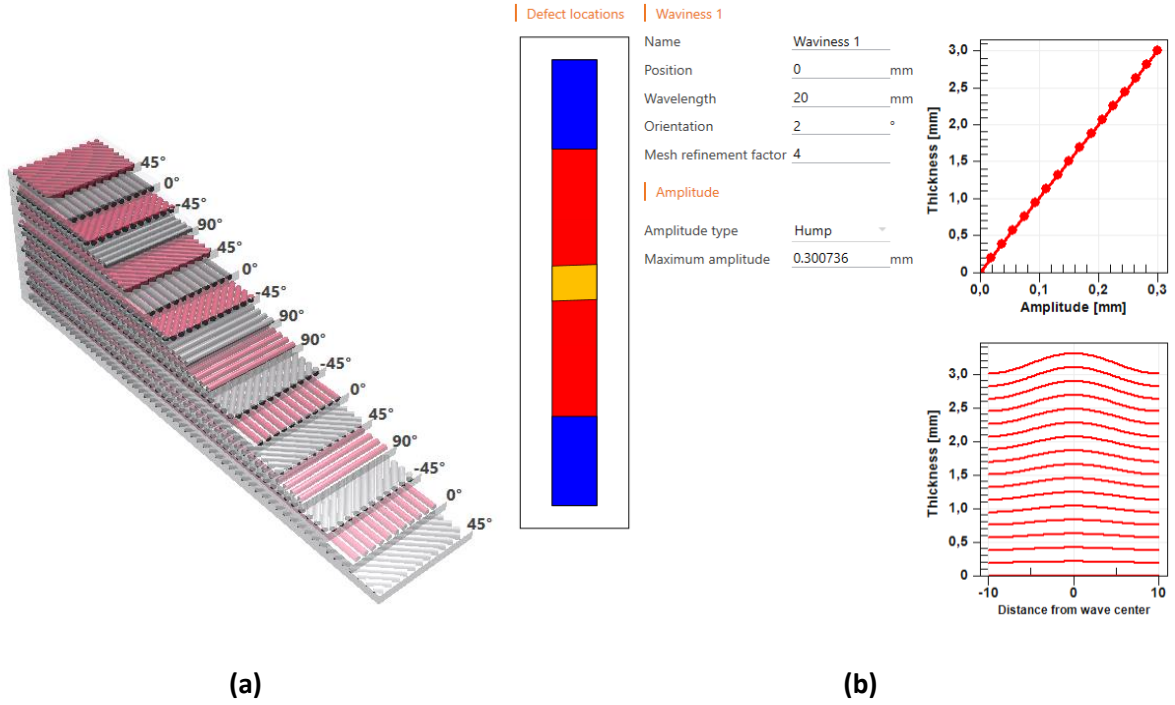


ŞEKİL 5 BOZULMA ÇALIŞMASI HESAPLANMASI

Digimat VA ara yüzü, bozulma tanımlamalarını daha da pratikleştirmek adına kesin tanımlamalardan ziyade, belirsiz/rastsal tanımlamaların yapılmasına imkân sağlamaktadır. Bu tanımlamaların yapılması ile ara yüz üzerinde kolayca bir Monte Carlo çözümü gerçekleştirilebilmektedir.

Parametreler üzerindeki belirsizlikler “Normal” dağılım modeli ya da tek tip “Uniform” olarak tanımlanabilmektedir. Ayrıca VA ara yüzü kullanıcının kendi dağılım modelini tanımlamasına da imkân sağlamaktadır. Normal dağılım modeli Gauss tipi dağılımla, genelde karşılaşılabilecek beklenen bir değer etrafında yoğunlaşan dağılım teşkil ederken, Uniform dağılım modeli, bütün seçeneklerin olasılığının eşit miktarda olmasını sağlamaktadır (Şekil 7).

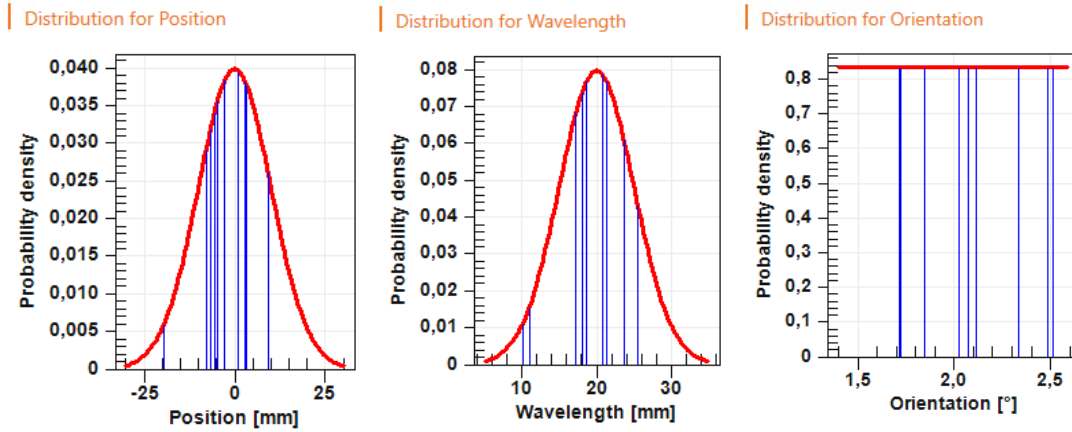
Örnek çalışma için AS4/8552 tek yönlü kumaşlardan oluşmuş Quasi Isotropic dizilimli 16 katmanlı bir lamina kullanılmıştır. Laminanın dizilimi Şekil 6 (a)'da verilmiş olup; ilk olarak dalgalanma üzerine bir bozulma tanımlanmış ve ardından belirsizlikler de tanımlanarak Şekil 7'deki örnek seçimleri elde edilmiştir.



ŞEKİL 6 LAMINA KATMAN DIZILIMI (A) VE BOZULMA TANIMLAMASI (B)

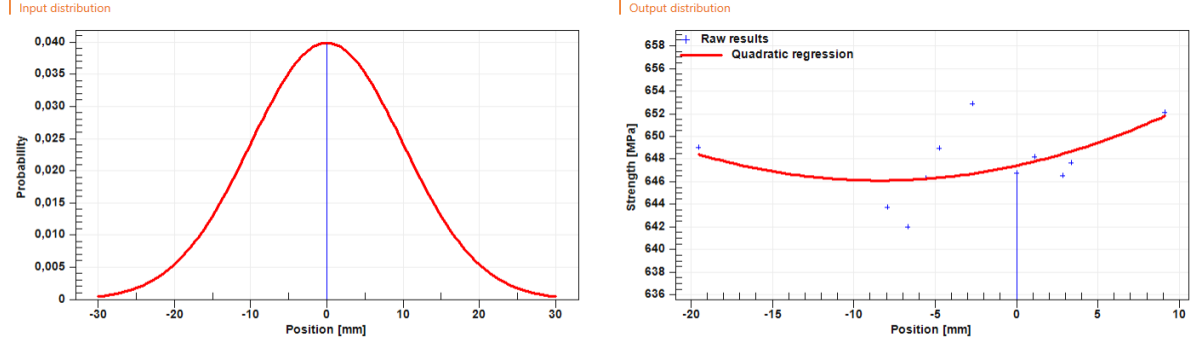
Parametric study parameters

ACTIVE	PARAMETER	NOMINAL VALUE	UNITS	DISTRIBUTION	BASIS	VARIATION DEFINITION
<input checked="" type="checkbox"/>	Position	0	mm	Normal	Absolute	10
<input checked="" type="checkbox"/>	Wavelength	20	mm	Normal	Absolute	5
<input type="checkbox"/>	Maximum amplitude	0.30074	mm	Uniform	Absolute	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Orientation	2	°	Uniform	Absolute	1.2

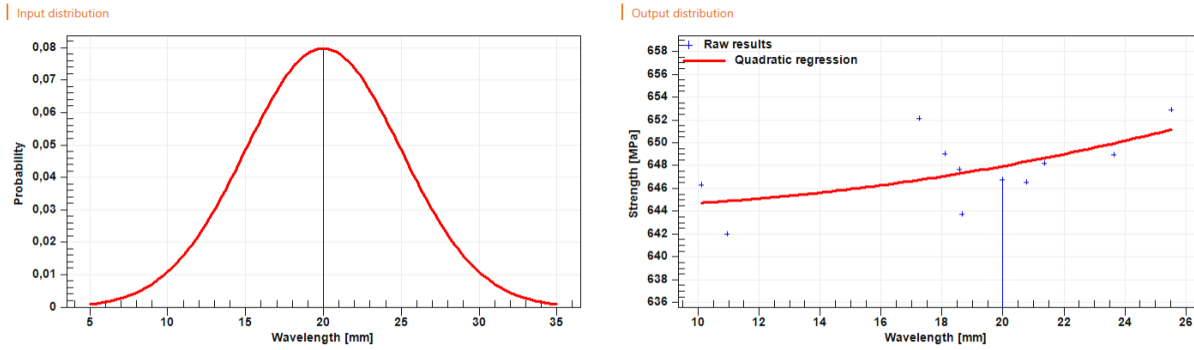


ŞEKİL 7 BELIRSİZLİK PARAMETRELERİ VE DAĞILIM GRAFİKLERİ (MAVİ ÇIZGILER SEÇİLMİŞ DEĞERLERİ GÖSTERMEKTEDİR)

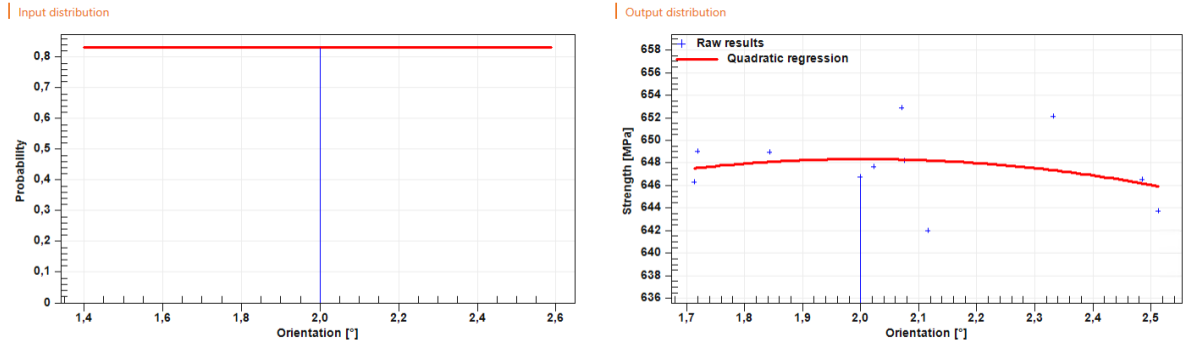
Sonuçların değerlendirilmesi, indirgenme faktörleri ya da dayanımın oranı şeklinde yapılabilmektedir. Aynı zamanda Digimat VA içerisinde rastsal analiz sonuçları girdi dağılımlarına karşılık olarak çıktı dağılımları şeklinde hesaplanabilmektedir. Çıktı analiz sonuçları içerisinde linear ya da ikinci dereceden regresyon yöntemleri ile çıktı dağılımları hesaplanabilmektedir.



ŞEKİL 8 DALGALANMA KONUMU HAKKINDA GIRDİ DAĞILIMI VE ÇIKTI DAĞILIMI



ŞEKİL 9 DALGALANMA GENİŞLİĞİ HAKKINDA GIRDİ DAĞILIMI VE ÇIKTI DAĞILIMI



ŞEKİL 10 DALGALANMA ORYANTASYONU HAKKINDA GIRDİ DAĞILIMI VE ÇIKTI DAĞILIMI

ÖRNEK İŞ AKIŞLARI

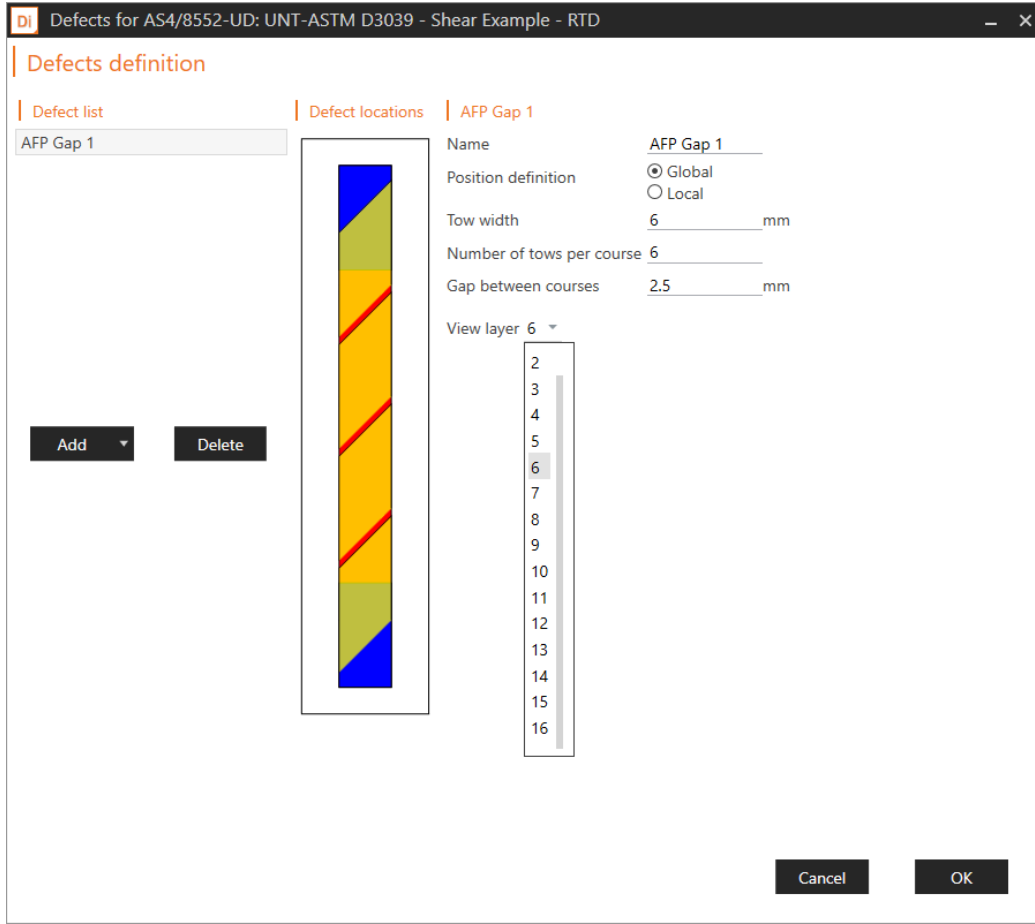
İncelenmiş olan çözüm yöntemleri, bozulmalar sonucu laminaların dayanımlarındaki değişimleri belirlemeye imkan sağlamaktadır. Bu araçların kullanılabileceği örnek iş akışlarını sunmak, yeteneklerinin daha iyi anlaşılmasına imkan sağlayacaktır.

Parametrik çalışma yöntemleri; malzeme mekanik özelliklerinin değişiminin, lamina mekanik özellikleri üzerindeki etkisini tahmin etme şansı sunar. Bu çalışma yöntemi, malzeme mekanik özelliklerine bağlı kapsayıcı bir zarf belirlenip güvenli tarafta kalmayı sağlayacak değerlerle çalışılmasına imkan sunmaktadır. Örnek bir durum olarak fabrika içerisinde yıllarca üretilecek aynı ürünün kupon testi sonuçlarının yıllar içerisinde yenilenmemesi gösterilebilir. Üretim hakkındaki işçiliğe yüksek derecede bağlı olan kompozit malzeme özellikleri, yaşanan farklılıklar sonucu tekrar kontrol edilmelidir. Bu durumda bütün bir test kampanyası düzenlemek yerine farklılıkları öngörmeye yardımcı olacak yöntemler kullanılarak ya da birkaç test kuponundan oluşan düşük bütçeli bir test kampanyası düzenlenerek değişkenlik seviyeleri belirlenebilir. Belirlenen bu parametreler Digimat VA Parametric Study ara yüzünde işlenerek yeni malzeme özellikleri belirlenebilmektedir.

Bozulma çalışmaları ara yüzü bozulmaların, rastsal ya da kesin bir şekilde tanımlanmasına imkan sağlamaktadır. Kritik bir parça üzerinde görülen bozulmalar Digimat VA Defect Study ara yüzünde birebir tanımlanarak buna bağlı kupon testleri ile hasar bölgesinde oluşacak dayanım indirgenmesi belirlenebilmektedir. Bu sayede parça analizlerinde bozulma bölgesinde bu Defect Study çıktısı olan değerler kullanılarak, dayanım hakkında öngörüler yapılabilmektedir.

Düzenli bir üretim bandı içerisinde üretilen ürün üzerinde aynı bölge içerisinde sürekli yaşanan bozulmalar Defect Study içerisinde belirsizlik analizi olarak tanımlanarak, rastsal girdiler sonucu malzeme mekanik özellikleri hakkında kapsayıcı bir zarf çıkarılabilmektedir. Böylece üretilmiş parçaların dayanımı hakkında öngörülere sahip olunarak, bu parçaların hurda edilmesinin önüne geçilebilmektedir.

Digimat VA ara yüzü, üretime bağlı değişkenliklerin normal bir kupon testinde tanımlanmasına izin vermektedir. Ancak AFP (Automatic Fiber Placement) yöntemi ile üretilen bir malzemenin dayanımı serim şekline ve serilmiş malzeme içerisindeki boşluklara bağlı değişkenlik göstermektedir. Bu problem, normal bir kupon testi analizinde sağlanmış olan serim oryantasyonundaki değişkenlik gibi tek bir parametre ile tanımlanamamaktadır ve daha detaylı bir inceleme gereklidir. AFP serimi içerisindeki boşluklar Defect Study ara yüzünde tanımlanarak bu boşluğun dayanıma etkisi modellenilebilmektedir.



ŞEKİL 11 AFP ÜRETİMİNDEKİ BOŞLUKLARIN TANIMLANMASI