

SLS Yöntemiyle Üretilmiş Parçalarda Üretim Sonrası Burulma ve Gerilme Etkilerinin DIGIMAT AM ile Hesaplanması

HAZIRLAYAN
Erkin Barış Güngör Kd. Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih: 19/07/2022

EKLEMELİ İMALAT

Makine ile işleme gibi, talaşlı imalat yöntemlerine karşı birçok avantaja sahip olan eklemeli imalat yöntemleri, endüstrideki potansiyeli sebebiyle dikkat çekmektedir. Ancak bu imalat yöntemleri, üretim sırasında oluşan ısıl farklar sebebiyle, ürün yapısında ufak bozulmalara yol açabilmektedir. Üretimde yüksek verimliliğe ulaşabilmek adına bu çarpılma etkilerinin hesaplanabilmesi, endüstri için önemli bir ihtiyaçtır. Digimat “Eklemeli İmalat” modülü, yapının basım sonrası faz değişimi kaynaklı geometrik bozuklukları hesaplayabilme ve doğru ürünün basımı için yeni üretim geometrisi önerebilme gibi yetenekleri ile mühendislere, “ilk seferde doğru basım” olanağı sunmaktadır.

Bu yazıda, Digimat AM (Additive Manufacturing) modülü aracılığıyla, üretilecek ürünün basım sonrası sahip olacağı şekli tahmin etme üzerine bir akış paylaşılacaktır.

KRİSTALLENME DERESESİ

Kristalleşme, erimiş durumdaki malzeme parçacıklarının, soğuma esnasında enerji seviyelerini düşürerek, kendilerini düzenli bir matrise çevirmesi olayıdır. Amorf yapıdan kristal yapıya geçerken, malzeme içerisindeki birçok mekanik özellik de (Elastik modül vb.) beraberinde değişmektedir.

SLS (Selective Laser Sintering) yöntemi, toz yapısındaki materyalin, lazer yardımı ile katman içerisindeki belirli bir şeklin ısıtılması ve ardındaki soğuma süreci ile katılma sonucu ürün elde edilmesidir. Bu katılma esnasında kristalleşme sonucu materyal, eritilmiş katman ile aynı geometriye sahip olmayabilir. Katmanlar arasındaki bu farklar yapı oluşturulurken birikerek nihai ürünün geometrisinde çarpılma ve burulmalara yol açabilmektedir. Bu sebeplerle kristalleşmenin modellenmesi önem arz etmektedir.

Kristalleşme 3 ana adımdan oluşmaktadır. İlk adım, ana çekirdeğin oluşmasıyla geçen çekirdeklenme sürecidir. Ardından, bu çekirdek yapısı etrafında oluşmaya başlayan sferoid yapısı ana kristalleşme safhasını oluşturmaktadır. Son olarak da ikinci kristalleşme safhası gelmektedir. Bu aşamada sferoid yapılarının birbirine olan etkisi ile oluşan kristalleşme gerçekleşmektedir.

Kristallenme derecesini modellemek için oluşturulmuş Double Nakamura modeli, ana ve ikincil kristalleşmeyi de hesaba katabilmesi sebebiyle, yavaş soğuma durumlarında bile isabetli sonuçlar vermektedir. Bu model aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

$$X(t) = \alpha X_1(t) + (1 - \alpha)X_2(t)$$

$$X_i(t) = 1 - \exp\left(-\left(\int_0^t K'_i(T) dT\right)^{n_i}\right)$$

$$K'_i(T) = \begin{cases} M_i \frac{k_i}{\lambda_i} \left(\frac{T - \theta}{\lambda_i}\right)^{k_i - 1} \exp\left(-\left(\frac{T - \theta}{\lambda_i}\right)^{k_i}\right) & \text{if } T \geq \theta \\ 0 & \text{if } T < \theta \end{cases}$$

Burada;

- $K'_i(T)$ Nakamura sabiti (*Nakamura Constant*)
- n_i Avrami indisi (*Avrami Index*)
- α ağırlık parametresi (0 ile 1 arasında) (*Weighting Parameter*)

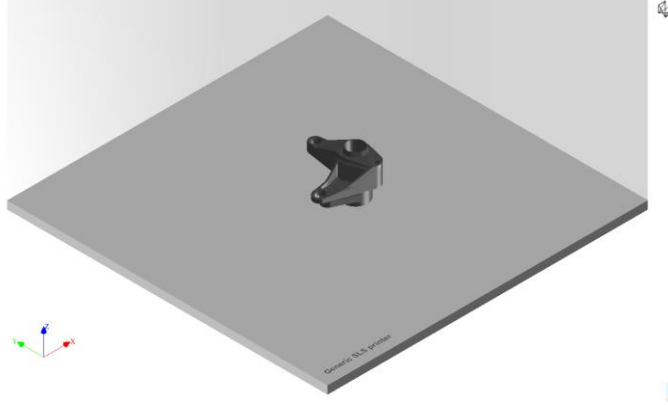
İfade etmektedir. Nakamura sabiti Weibull dağılımı kullanılarak kalibre edilmektedir. Burada;

- θ ötelenme sıcaklığı (*translation temperature*)
- k_i şekil parametresi (*shape parameter*)
- λ_i ölçek parametresi (*scale parameter*)
- M_i boyut parametresi (*magnitude parameter*)

ifade etmektedir.

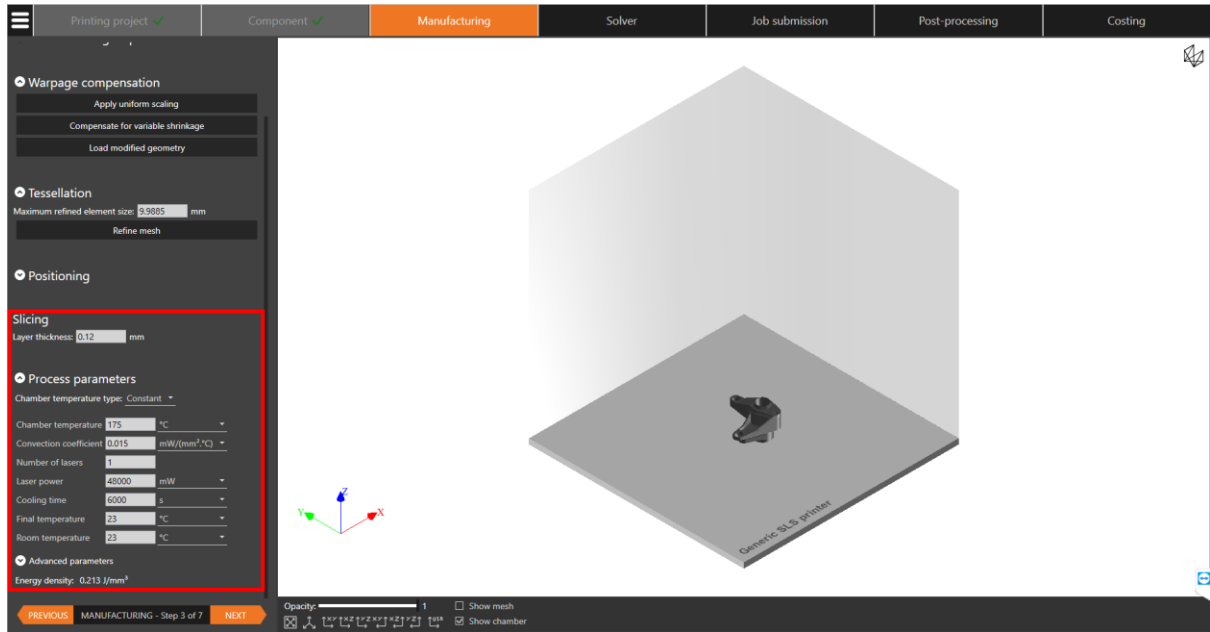
DIGIMAT AM İLE ÜRETİMİN MODELLENMESİ

Digimat AM modülü açıldıktan sonra incelenecek yapının 3 boyutlu geometrisi içeri alınır ve üretimin yapılacağı yazıcının boyutsal bilgileri girilir.



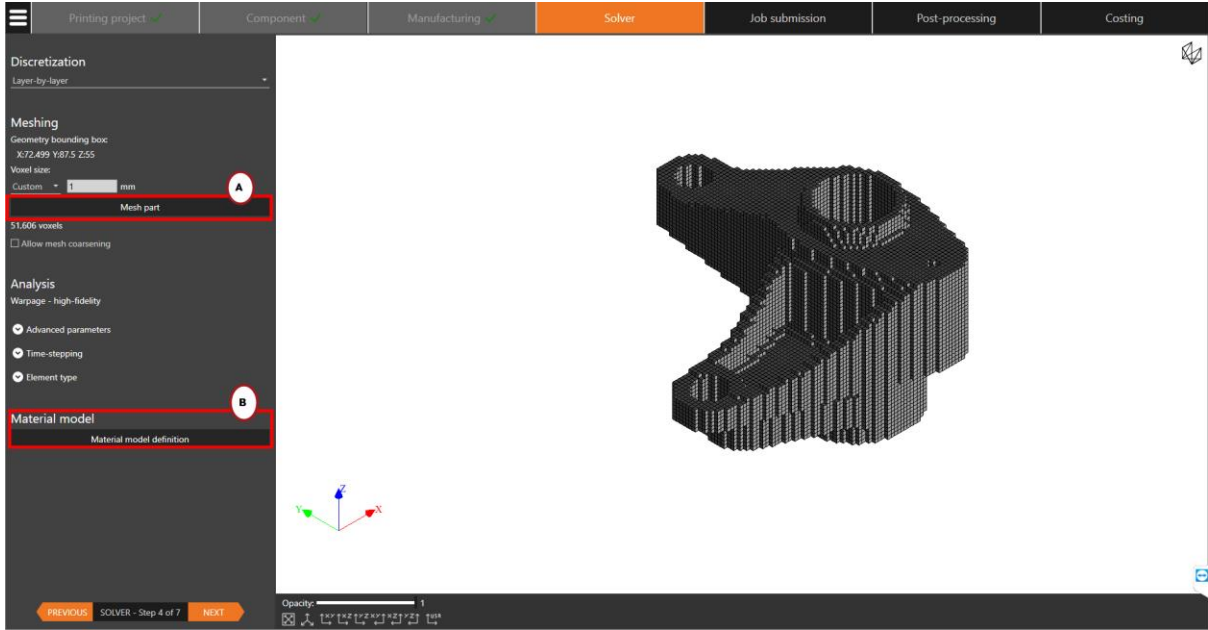
Şekil 1: Digimat Arayüz – Üretilecek parça geometrisi

Üretim için kullanılacak olan malzeme bilgileri Digimat malzeme kütüphanesinden model içerisine aktarılmıştır. Kullanılacak SLS yazıcının basım bilgileri de arayüz üzerinden girilmiştir.



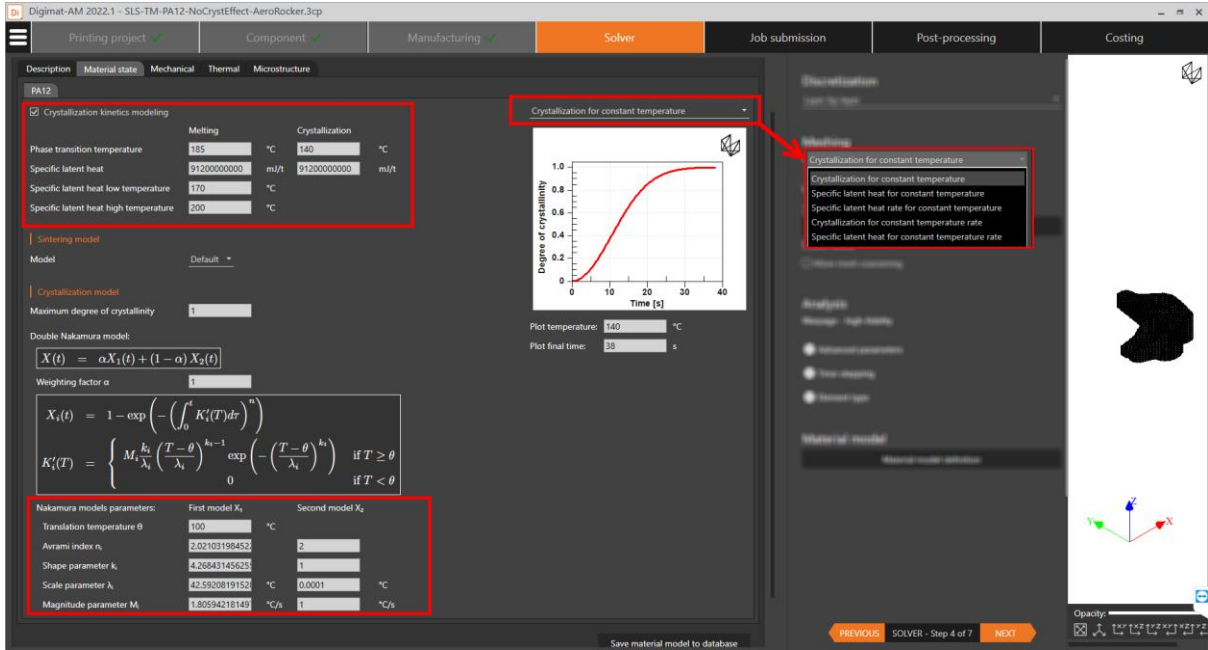
Şekil 2: Digimat Arayüz – Yazıcı bilgilerinin girilmesi

Arayüz içerisinde bir sonraki adım çözüm yapılacak Mesh'in oluşturulmasıdır. Digimat, çözümlerini yüksek kalitede tutmak amacıyla küçük boyutlu Hexagonal elemanlar kullanmaktadır. Bu elemanların boyutu yine arayüz üzerinden ayarlanabilmektedir. Oluşturulmuş Mesh ve eleman özellikleri verilmiştir.



Şekil 3: Digimat Arayüz – Mesh yapısı (a) ve malzeme modelinin (b) girilmesi

Malzeme modeli sekmesi üzerinden, Warpage çözümü için gerekli olan kristalleşme özellikleri ve malzemenin diğer termomekanik özellikleri tanımlanmalıdır. Kristalleşme özellikleri, sabit bir sıcaklık değeri için zamana bağlı olarak veya farklı sıcaklık derecelerindeki kristalleşme özellikleri olarak girilebilmektedir.



Şekil 4: Digimat Arayüz – Malzemenin kristalleşme modeli bilgilerinin girilmesi

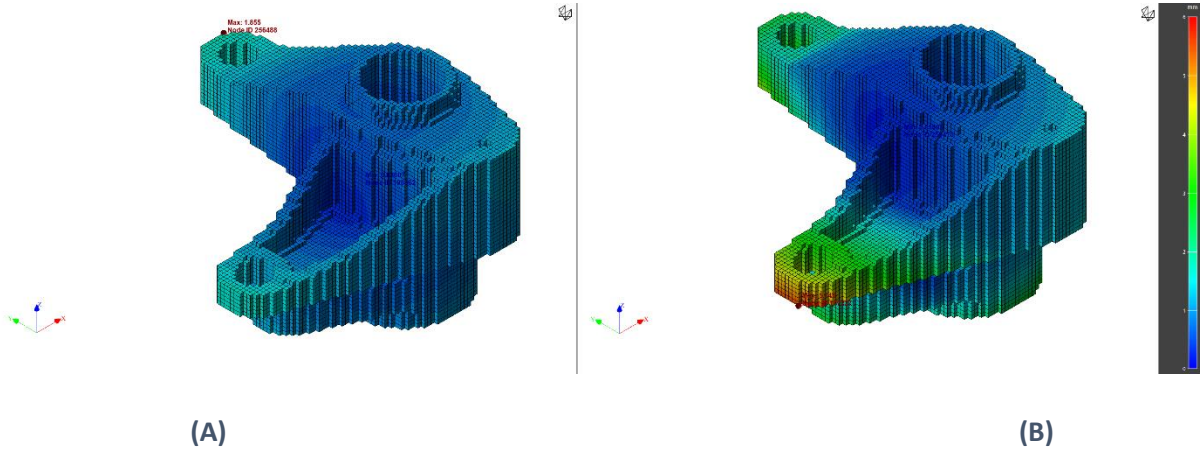
Kristalleşme derecesi, verilen girdilere göre her bir adımda hesaplanmakta ve bir sonraki adıma etkileri yansıtılmaktadır. Bu sayede lokal olarak yaşanan farklı soğuma değerlerine bağlı oluşan termal gerilmelerin etkileri detaylı olarak incelenebilmektedir.

KRİSTALLEŞMENİN BURULMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Kristalleşmenin burulma üzerindeki etkilerini modelleyebilmek adına; aynı model, hem kristalleşme etkilerinin yok sayıldığı şekilde, hem de yarı-kristal yapıya sahip olarak çözdürülmüştür.

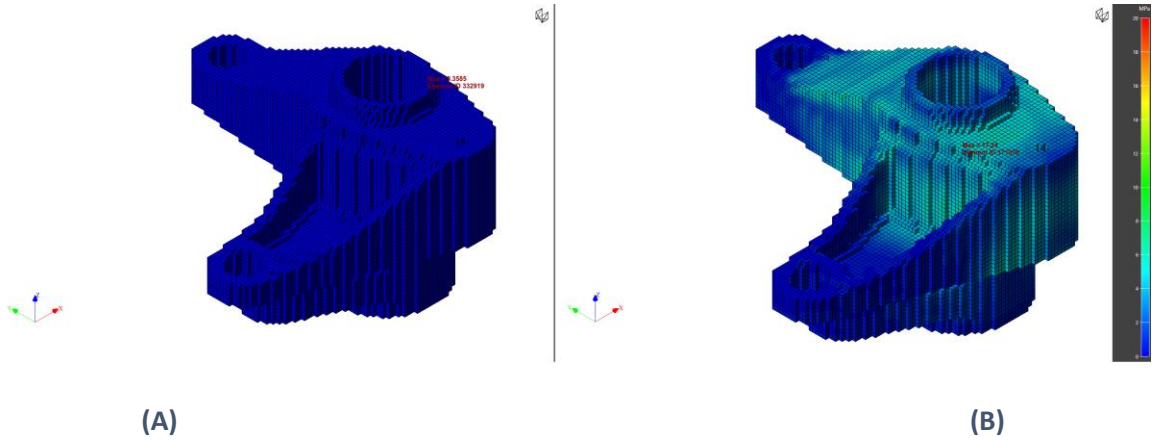
Kristalleşmenin yok sayıldığı modelde, yapının burulması, katmanların soğuması sırasında oluşan kalıntı gerilmeler ile yaşanırken; kristalleşme etkileri modele yansıtıldığında, iç yapıda meydana gelen mekanik özelliklerin de değişmesi sebebiyle şekil değiştirme etkileri daha doğru bir şekilde hesaplanabilir.

Digimat AM ile yapılmış analiz sonuçları karşılaştırıldığında, çarpılma (warpage) farkı görülmektedir.



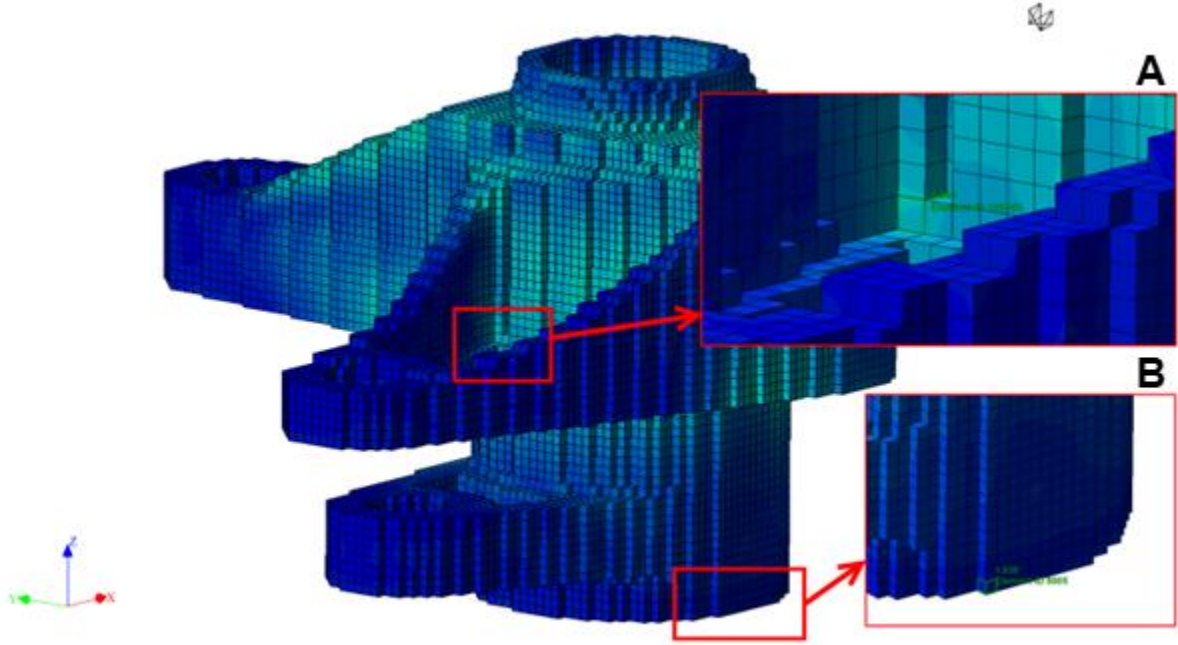
Şekil 5: Kristalleşme etkilerinin hesaba katılmadığı (a) ve katıldığı sonuçlar (b) – Çarpılma [mm]

Nihai ürün içerisindeki kalıntı gerilmeler (residual stress) verilmiştir. Kristallik derecesinin tanımlaması ile oluşan farklar bariz bir şekilde görülebilmektedir.

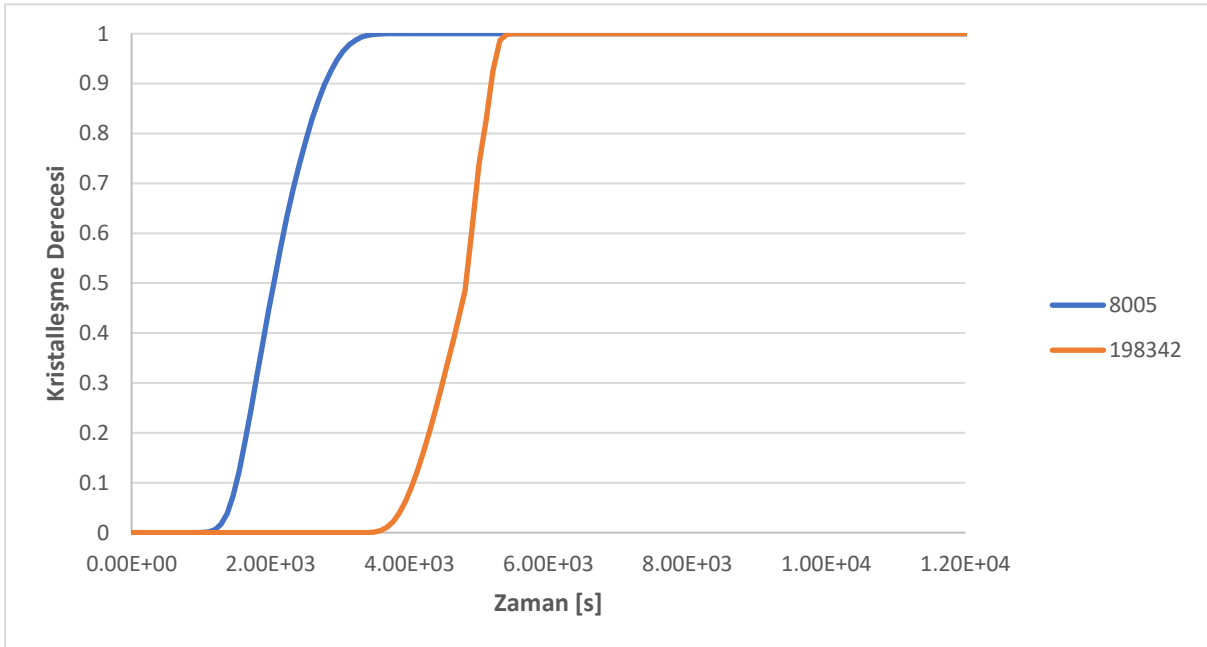


Şekil 6: Kristalleşme etkilerinin hesaba katılmadığı (a) ve katıldığı sonuçlar (b)-VonMises Stress[MPa]

Kristalleşme, üretim sırasında bölgesel olarak gerçekleşmektedir ve Digimat AM içerisinde buna bağlı olarak hesaplar yapılmaktadır. Nihai ürün içerisindeki çarpılma etkileri, lokal olarak, zaman ve sıcaklığa bağlı hesaplanmakta olup, bu durum iki ayrı bölgenin kristalleşme derecelerinin zamana bağlı olarak incelenmesi ile görülebilir. Kristalleşmenin tanımlı olduğu çözümde iki ayrı bölgeden alınmış olan sonuçlar paylaşılmıştır.



Şekil 7: Lokal Kristalleşme derecesi sonuçları (A) – Eleman #198342, (B) – Eleman #8005



Şekil 8: Zamana bağlı Kristalleşme Derecesi sonuçları

SONUÇ

Eklemeli imalat yöntemlerinin matematiksel modeli hazırlanmak istendiğinde birçok fiziksel etkinin hesaba katılması gerekmektedir. Digimat AM modülü, arayüzü içerisinde, basım ve malzeme hakkında sunmuş olduğu detaylı parametrelerle gerçeğe daha yakın bir modelin oluşturmasına imkan tanımaktadır. Bu yetenekler sayesinde üretilmesi planlanan parçanın üzerindeki çarpılma ve gerilme etkileri bilgisayar ortamında gerçekçi sonuçlarla hesaplanabilmektedir.

REFERANSLAR

1. Digimat 2021.4 User's Manual
2. Robust Numerical Resolution of Nakamura Crystallization Kinetics – Arthur Levy