

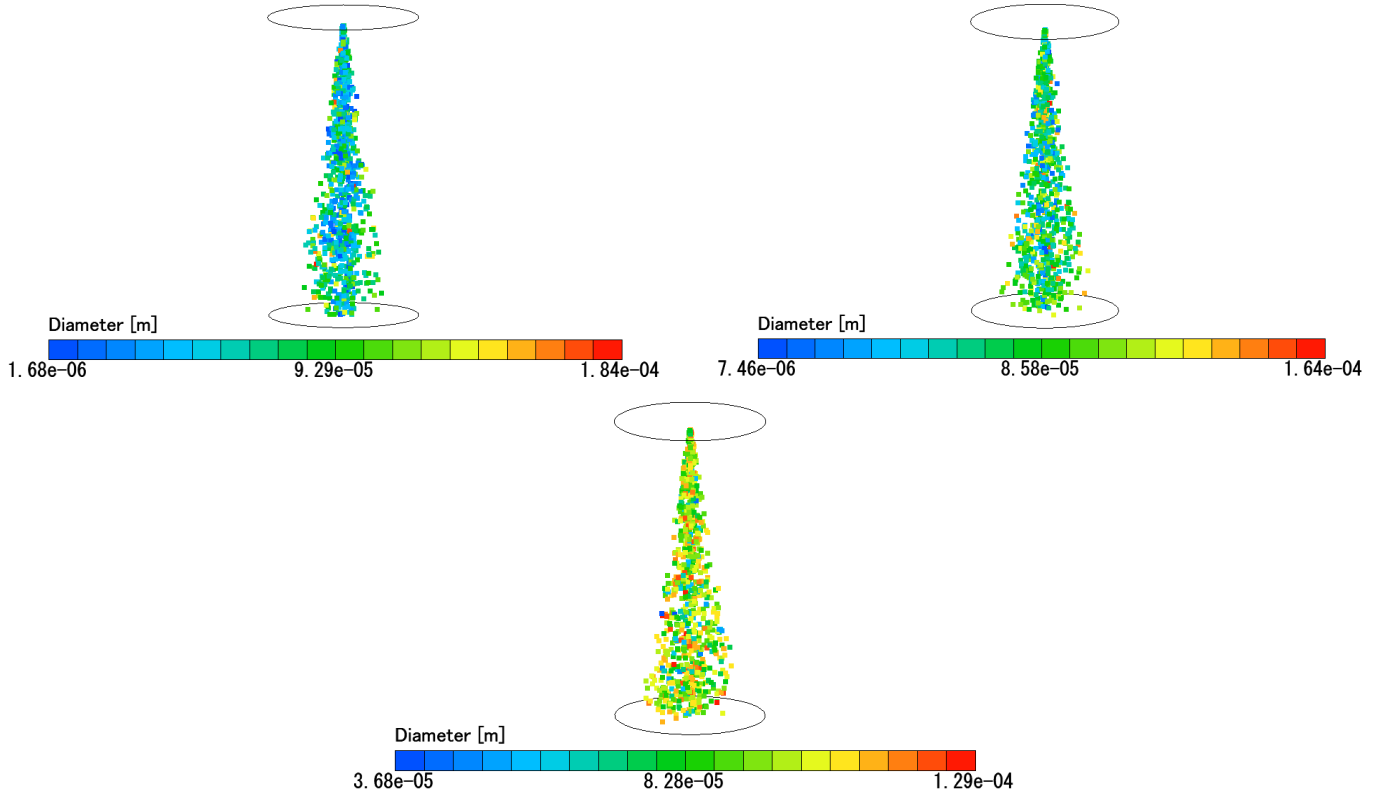
TEKNİK DOKÜMAN



Cradle CFD

Bu teknik dokümanda Cradle CFD yazılımı Sprey modeli detaylı olarak incelenmiştir.

TAB ve WB damlacık parçalanması modellerinin matematiksel parametreleri ile spray modeli simülasyon sonuçlarının uyumu karşılaştırılmıştır. Sprey uygulamalarında kullanılabilecek yazılım parametreleri görsel sonuçlar ile örneklendirilmiştir.



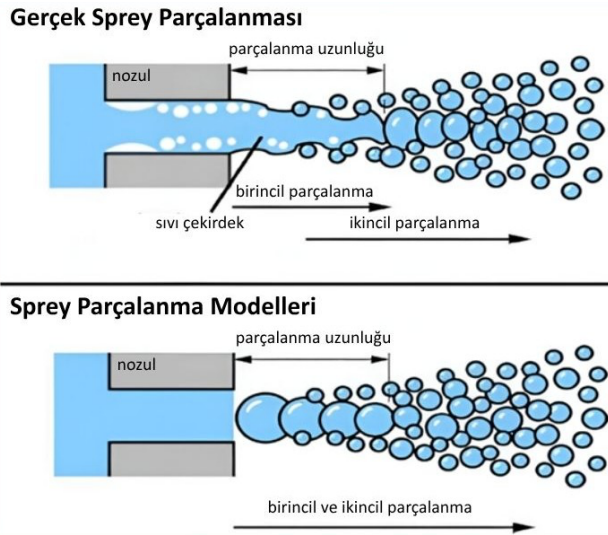
Cradle CFD ile Sprey Damlacık Parçalanma İncelemesi: TAB ve WB Modelleri

Hazırlayan	Onaylayan
Emine Taşkın CFD Aday Mühendisi	Önder YILMAZ Kıdemli Uzman CFD Uygulama Mühendisi

Tarih: 04/12/2025

1. GİRİŞ

Farklı fazların birbiri içinde dağılması (dispersiyonu) olgusu, motor teknolojilerinden çevresel mühendislik uygulamalarına kadar geniş bir alanda karşımıza çıkmaktadır. Bu tür çok fazlı akış süreçlerinin doğru modellenmesi; otomotiv, havacılık, enerji üretimi, tarım makineleri ve çevre teknolojileri gibi birçok endüstride, yanma verimliliğinin artırılması, soğutma ve püskürtme sistemlerinin geliştirilmesi ile emisyon kontrolünün sağlanması gibi performansın optimize edilmesine yönelik uygulamalarda kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, spreyleerin çalışma dinamiğinin ve damlacıkların akışkan ortam içerisinde hangi etkiler altında nasıl davrandığının anlaşılması, sistem performansını doğrudan belirleyen bir faktördür. Damlacık parçalanma davranışının etkin biçimde öngörülebilmesi ise, fazlar arasındaki etkileşimlerin neden olduğu fiziksel mekanizmaların ayrıntılı olarak incelenmesini gerektirmektedir.



Şekil 1: Sprey parçalanması ve var olan parçalanma modellerinin karşılaştırılması [1].

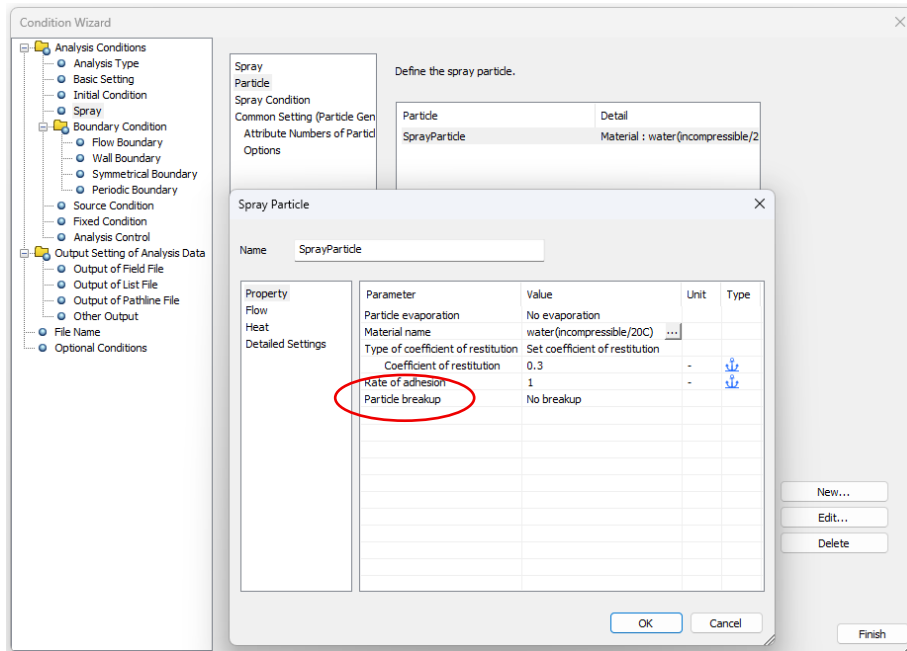
Sprey damlacıklarının parçalanması, damlacığın çapı, yüzey gerilimi, ilk salınım genliği, gaz-sıvı fazları arasındaki bağıl hız ve Weber sayısı gibi birçok parametreye bağlı olması sebebi ile hidrodinamik olarak oldukça karmaşık bir süreçtir. Bu tür karmaşık çok fazlı akış analizlerinde, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri, fiziksel süreçlerin nümerik olarak modellenmesine olanak tanıyarak parçalanma ve dağılım davranışlarının doğru biçimde tahmin edilmesini sağlamaktadır.

Damlacık parçalanması, Şekil 1’de gösterilmiş olan birincil ve ikincil parçalanma mekanizmaları temel alınarak, farklı fiziksel yaklaşımlar aracılığıyla matematiksel olarak modellenmektedir. Dalga Parçalanma (Wave Breakup - WB) Modeli damlacığın yüzeyinde gelişen Kelvin-Helmholtz kararsızlıklarını esas alarak birincil parçalanmayı öngörürken; Taylor Benzetim Parçalanma (Taylor Analogy Breakup - TAB) Modeli, damlacığın deformasyonunu yay-kütle sistemine benzeterek ikincil parçalanmanın modellenmesini sağlamaktadır. Cradle CFD ile çok fazlı akış analizlerinde, TAB ve WB modelleri kullanılarak damlacık parçalanma sürecinin dinamikleri ve Nukiyama-Tanasawa dağılım fonksiyonu ile damlacık boyutu dağılımlarının nümerik olarak öngörülmesi mümkün olmaktadır. Nukiyama-Tanasawa dağılım fonksiyonunun çözüme dahil edilmesi ile damlacık boyutu dağılımlarının gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi sağlanmaktadır.

Bu teknik yazıda, Cradle CFD ortamında TAB ve WB damlacık parçalanma modelleri incelenmiş ve her bir model için parçalanmayı etkileyen temel parametrelerin (Weber sayısı, yüzey gerilme katsayısı, damlacık çapı, ilk salınım genliği, vb.) analiz sonuçlarına etkileri değerlendirilmiştir. Bu sayede iki modelin avantajları, sınırları ve uygulama alanları sistematik bir biçimde irdelenmiştir.

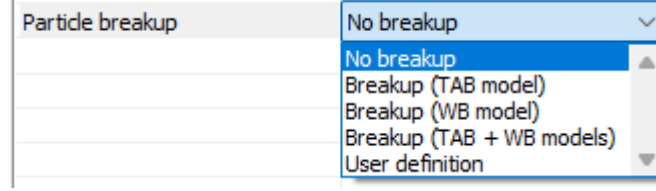
1.1. Cradle CFD’de Damlacık Parçalanması (Particle Breakup) Mekanizması

Cradle CFD yazılımı, sprej (Spray) model kullanılan akış analizlerinde sıvı damlacıkların gaz ortamı ile etkileşimini, Şekil 2’de görülen damlacık parçalanması mekanizması ile modellemektedir.



Şekil 2: “Spray” model altındaki “Particle Breakup” mekanizması.

Bu mekanizma, farklı fiziksel yaklaşımlara dayalı parçalanma modellerini kullanıcıya sunarak, sprey davranışının akış koşullarına bağlı olarak doğru şekilde temsil edilmesini amaçlar. Bu teknik yazıda Cradle CFD'nin sunduğu, Şekil 3'de gösterilmiş olan WB Modeli ve TAB Modeli olmak üzere iki temel parçalanma modeli üzerinde durulmuştur.



Şekil 3: Parçalanma modelleri.

R. D. Reitz tarafından geliştirilen WB modeli, damlacık parçalanmasını gaz ve sıvı fazları arasındaki bağıl hızın neden olduğu en hızlı büyüyen Kelvin–Helmholtz kararsızlığını temel alarak damlacıkların parçalanma zamanını ve ortaya çıkan yeni damlacık boyutlarını belirlemektedir. WB modeli özellikle Weber sayısı 100'den büyük olan, yüksek Weber sayılı akışlarda güvenilir sonuçlar vermektedir. Weber sayısı, atalet kuvvetlerinin yüzey gerilimi kuvvetlerine olan oranını ifade eden boyutsuz bir sayıdır.

$$We = \frac{\rho_g \Delta V^2 r}{\sigma} \quad (1)$$

Yüksek Weber sayısı, düşük yüzey gerilimini veya aerodinamik kuvvetlerin baskınlığını ifade eder. Bu nedenle, Weber sayısının artmasıyla Rayleigh rejiminden tam atomizasyona geçiş hızlanır. WB model hesaplama parsel sayısını artırabileceğinden, hesaplama verimliliği açısından başlangıçta daha düşük sayıda damlacığın hesaplamalara dahil edilmesi çözüm süresi açısından avantaj sağlamaktadır [2].

WB model, spreyden püskürtülen damlacıkların sıvı sütunu şeklindeki bir nesnenin arayüzünden oluştuğunu simüle etmektedir. Bu modelde, yarıçapı a olan bir damlacık yüzeyine belirli bir dalga boyunda ilk titreşim uygulandığında, maksimum titreşim anındaki dalga boyu (Λ), Denklem 2 ile ve büyüme oranı (Ω), Denklem 3 ile hesaplanmaktadır [3].

$$\frac{\Lambda}{a} = 9.02 \frac{(1 + 0.45Z^{0.5})(1 + 0.47T^{0.7})}{(1 + 0.82We_g^{1.67})^{0.6}} \quad (2)$$

$$\Omega \left[\frac{\rho_l a^3}{\sigma} \right]^{0.5} = \frac{(0.34 + 0.38We_g^{0.5})}{(1 + Z)(1 + 1.4T^{0.6})} \quad (3)$$

Denklemlerde yer alan, We_g gaz faz için Weber sayısını, ρ_g gaz fazın yoğunluğunu, ΔV damlacıklar ile ortamdaki gaz arasındaki bağıl hızı, σ damlacıkların ve çevreleyen akışkanın yüzey gerilimi katsayısını, We_l püskürtülen akışkanın Weber sayısını, ρ_l püskürtülen damlacıkların yoğunluğu, Re_l ise püskürtülen akışkanın Reynolds sayısını temsil etmektedir. Ohnesorge sayısı (Z), sıvının viskoz etkilerinin atalet ve yüzey gerilimi kuvvetlerine oranını tanımlayan boyutsuz bir parametredir.

$$Z = \frac{We_l^{0.5}}{Re_l} \quad (4)$$

Viskozite ve aerodinamik kuvvetleri temsil eden T parametresi, parçalanma sürecinde etkilidir.

$$T = ZWe_g^{0.5} \quad (5)$$

Damlacık yarıçapı, en hızlı büyüyen kararsızlık dalga boyunun 0.61 katı veya daha fazlasına ulaşma ($a \geq 0.61\Lambda$) koşulu sağlanırsa parçalanma gerçekleşmektedir. Parçalanma süresi (τ), Denklem 6 ve parçalanma sonucu oluşan damlacıkların yarıçapı (a), Denklem 7 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\tau = 3.736 \frac{B_1 a}{\Lambda \Omega} \quad (6)$$

$$a = \min \left(\left(\frac{3\pi a^2 \Delta V}{2\Omega} \right)^{0.33}, \left(\frac{3a^2 \Lambda}{4} \right)^{0.33} \right) \quad (7)$$

TAB model ise sıvı jetlerinin ve ince sıvı tabakalarının parçalanmasıyla oluşan damlacıkların, yüksek hızlı hava akımında daha küçük damlacıklara ayrılmasını, Taylor'ın yay-kütle analogisine dayanarak simüle etmektedir. Damlacıkların şeklinin başta küre olduğu varsayılmaktadır [2]. TAB modeli kullanan simülasyonlarda, damlacık üzerindeki kuvvetler diferansiyel denklemlerle modellenir ve damlacıkların zaman içinde deformasyon titreşimi nedeniyle deforme olarak parçalanma zamanı hesaplanmaktadır. TAB modelin matematiksel formülasyonunda kullanılan t zamanı, Δt zaman adımını, ρ_l püskürtülen damlacığın yoğunluğunu, r püskürtülen damlacık yarıçapını, μ_l damlacıkların dinamik viskozitesini, σ damlacıkların ve çevreleyen akışkanın yüzey gerilimi katsayısını temsil etmektedir.

$$y(t + \Delta t) = \frac{We}{12} + e^{-\frac{\Delta t}{t_d}} \left\{ \left(y(t) - \frac{We}{12} \right) \cos(\omega \Delta t) + \frac{1}{\omega} \left(\dot{y}(t) + \frac{y(t) - \frac{We}{12}}{t_d} \right) \sin(\omega \Delta t) \right\} \quad (8)$$

$$\dot{y}(t + \Delta t) = \frac{\left(\frac{We}{12} - y(t + \Delta t) \right)}{t_d} + we^{-\frac{\Delta t}{t_d}} \left\{ \frac{1}{\omega} \left(y(t) + \frac{\dot{y}(t) - \frac{We}{12}}{t_d} \right) \cos(\omega \Delta t) - \frac{1}{\omega} \left(y(t) - \frac{We}{12} \right) \sin(\omega \Delta t) \right\} \quad (9)$$

Damla salınım zaman sabiti t_d ,

$$t_d = \frac{2 \rho_l r^2}{5 \mu_l} \quad (10)$$

Doğal salınım açısal frekansı ω ,

$$\omega = \sqrt{\frac{8\sigma}{\rho_l r^3} - \frac{1}{t_d^2}} \quad (11)$$

Damlacığın deformasyonu zamana bağlı y parametresi ile temsil edilmektedir ve damlacığın deformasyonunun zamana göre değişim hızı olan $\dot{y}$ parametresi kullanılarak hesaplanmaktadır. Hesaplanan deformasyon zamanla artarak ve kritik değeri aştığında ($y(t) \geq 1$) damlacık parçalanır [3]. TAB model düşük Weber sayılı ($We < 100$) damlacıkların düşük basınçta püskürtülmesi için oldukça uygun bir yaklaşımdır [4]. Ayrıca oldukça yaygın kullanılan TAB model, ikincil parçalanmayı modellemek için iyi tanımlanmış ve güvenilir bir modeldir [5].

TAB ve WB model, Weber sayısı, yüzey gerilme katsayısı, damlacık çapı, ilk salınım genliği ve gaz-sıvı fazları arasındaki bağıl hız gibi parametrelerden doğrudan etkilenmektedir. Cradle CFD yazılımında bu parametrelerin sistematik olarak değiştirilmesi, parçalanma mekanizmasının fiziksel eğilimlerini ortaya koymakta ve farklı uygulama senaryoları için uygun model seçimine olanak tanımaktadır.

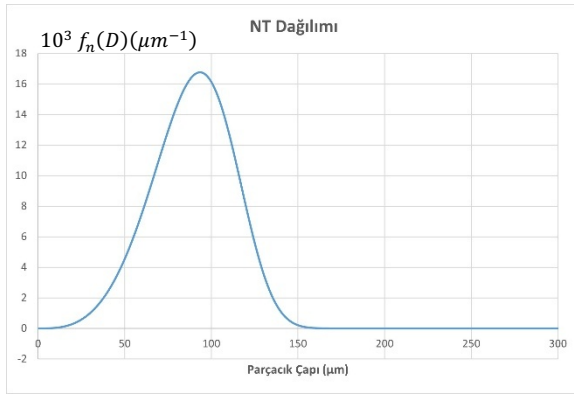
1.2. Nukiyama-Tanasawa Dağılım Fonksiyonu

Sprey model ile damlacıkların püskürtülme sürecinde yalnızca damlacıkların parçalanma mekanizması değil aynı zamanda ortaya çıkan damlacık boyutu dağılımı da spreyn fiziksel davranışını anlamak ve gerçeğe yakın modellemeler yapabilmek için kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, Cradle CFD yazılımında damlacık boyutu dağılımı kullanıcı isterleri doğrultusunda Nukiyama-Tanasawa (NT) dağılım fonksiyonu ile tanımlanabilmektedir. Nukiyama-Tanasawa dağılım fonksiyonu, Denklem 12 olarak aşağıda verilen fonksiyon ile damlacık çaplarının (D) belirli bir dağılım aralığında etkin bir biçimde tanımlanmasını sağlamaktadır.

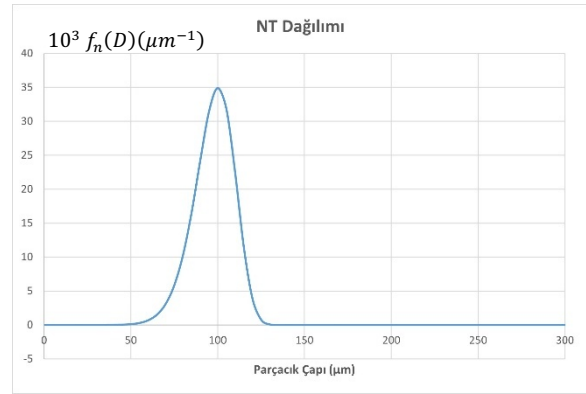
$$f_n\left(\frac{D}{D_{32}}\right) dD = A \left(\frac{D}{D_{32}}\right)^a \exp\left[-B \left(\frac{D}{D_{32}}\right)^\beta\right] \frac{dD}{D_{32}} \quad (12)$$

$$A = \frac{\beta}{\Gamma(a+1)} \left(\frac{\Gamma\left(\frac{a+4}{\beta}\right)}{\Gamma\left(\frac{a+3}{\beta}\right)}\right)^{a+1}, \quad B = \left(\frac{\Gamma\left(\frac{a+4}{\beta}\right)}{\Gamma\left(\frac{a+3}{\beta}\right)}\right)^\beta \quad (13)$$

Fonksiyon, α ve β olmak üzere kullanıcı tarafından tanımlanan iki temel parametreye dayanır. Aynı zamanda, A ve B parametreleri de α ve β parametrelerine bağlı iki fonksiyondur [3]. Dağılımın simetrisini ve eğrinin keskinliğini α parametresi belirlerken, β parametresi Sauter ortalama çapın (Sauter mean diameter - D_{32}) etrafındaki yayılım aralığını kontrol etmektedir.



Şekil 4: NT dağılımı (α : 3 ve β : 5).

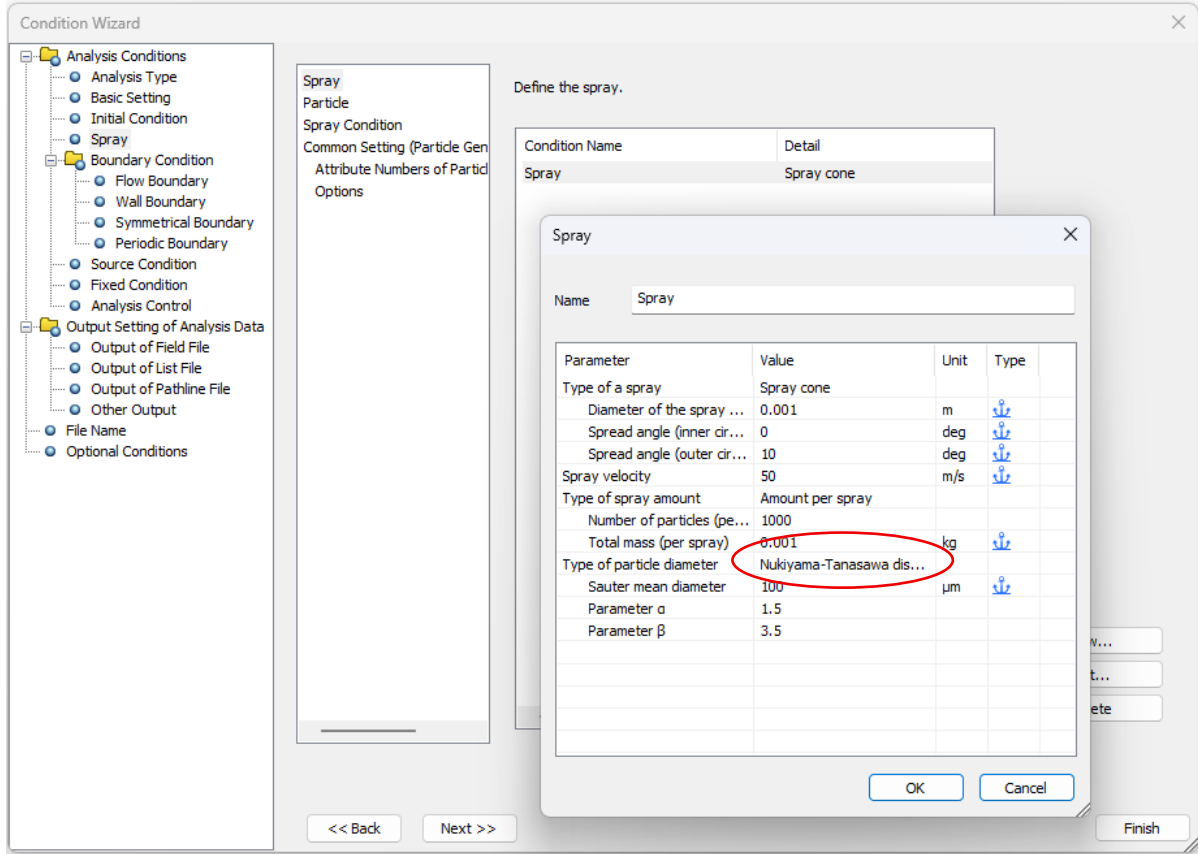


Şekil 5: NT dağılımı (α : 10 ve β : 8).

Şekil 4 ve Şekil 5'te de görüldüğü gibi yüksek α parametresi daha keskin bir eğriyi, düşük β parametresi ise daha geniş bir dağılım aralığını oluşturmaktadır. Fonksiyonun etkin çalışması için Cradle CFD, belirli limit sınır koşulları sunmaktadır.

$$\alpha > -1, \quad \beta > 0, \quad \frac{(\alpha + 4)}{\beta} \leq 171 \quad (14)$$

Bu parametreler, belirtilen sınır koşulları içerisinde kullanıcının isterleri doğrultusunda tanımlanabilir ve bu sayede spreyle püskürtülen damlacıkların dağılımı ile boyutsal özellikleri HAD analizlerine entegre edilerek incelenebilmektedir. Bu şekilde damlacık parçalanma modellerinin yanı sıra Şekil 6'da görülen Nukiyama-Tanasawa dağılım fonksiyonu seçeneğiyle farklı çaplarda parçacık dağılımı daha gerçekçi modellenebilmektedir.

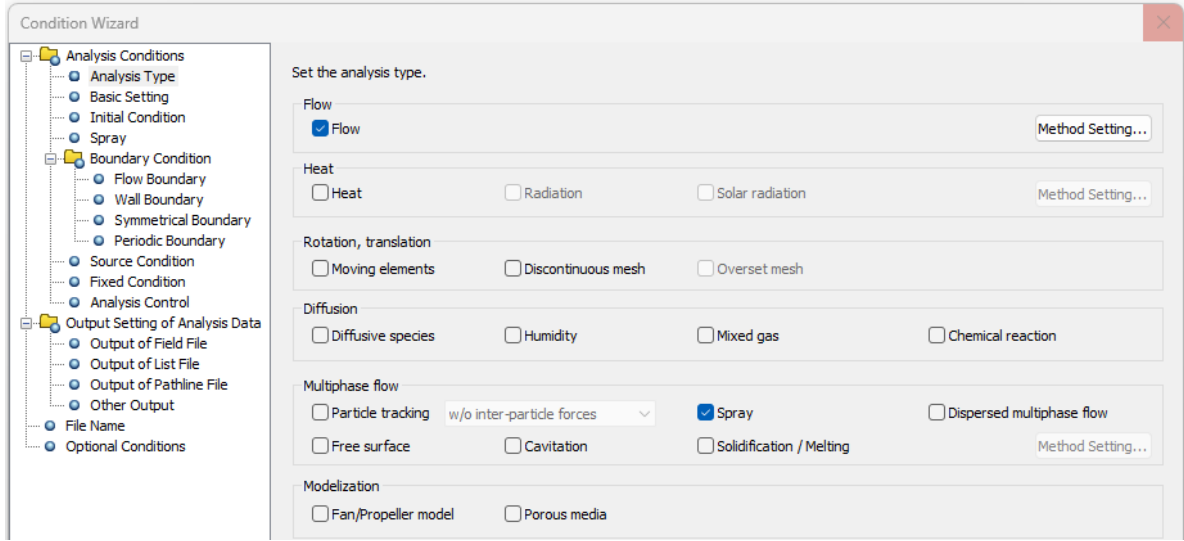


Şekil 6: Sprey menüsünde Nukiyama-Tanasawa dağılım seçeneği.

NT dağılımı, HAD tabanlı çok fazlı akış analizlerinde damlacık boyutu ve dağılım karakteristiklerini istatistiksel olarak tanımlayarak hidrodinamik parçalanma süreçlerinin daha güvenilir şekilde temsil edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca, yanma, buharlaşma ve emisyon hesaplamaları gibi termokimyasal süreçlerin simülasyonunda kritik bir parametre olarak, çok fazlı akışların aerodinamik ve kimyasal etkileşimlerinin sayısal analizinde temel bir referans teşkil etmektedir. Bu yaklaşım, gerçek sistemlerde gözlemlenen damlacık boyut çeşitliliğini istenilen kriterlerde yansıtarak mühendislik çözümlerinde önemli bir avantaj sunmaktadır.

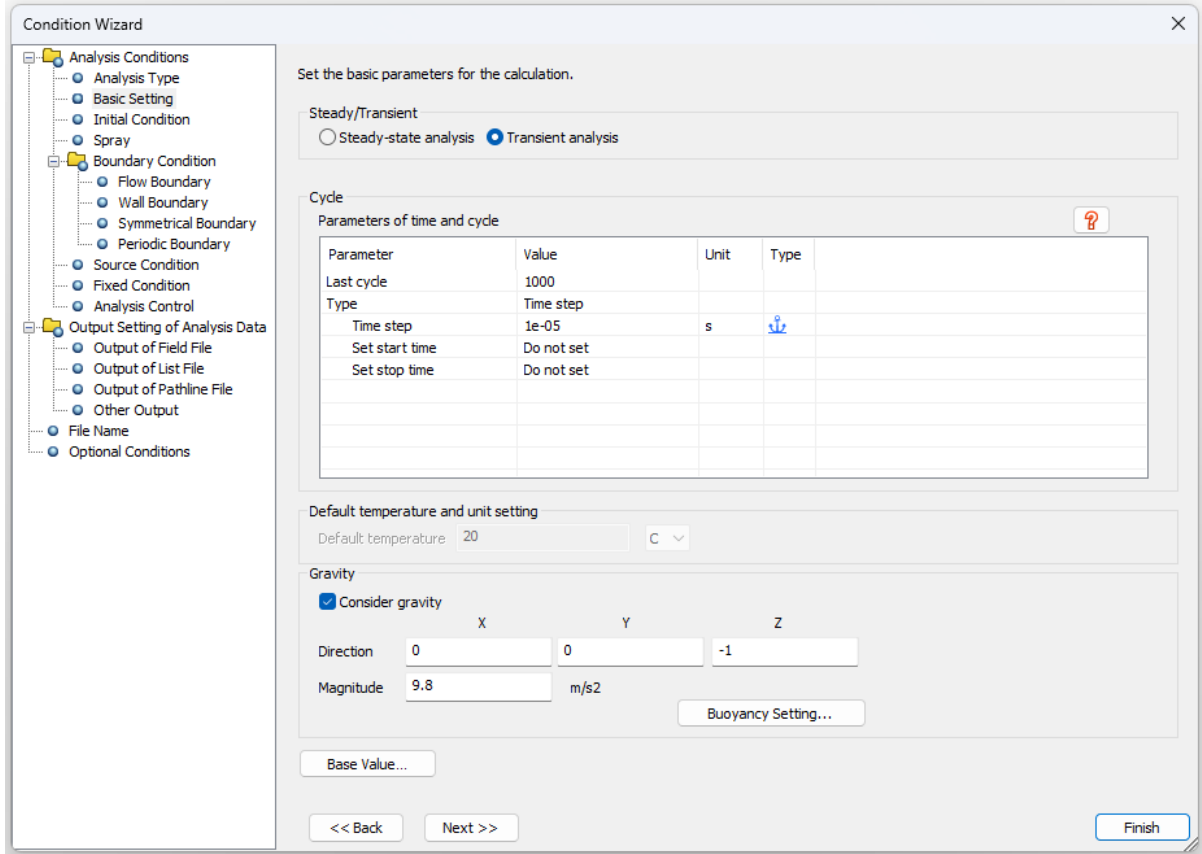
2. CRADLE CFD ORTAMINDA SPREY DAMLACIK PARÇALANMA MEKANİZMASI

Cradle CFD’de damlacık parçalanma mekanizması altında bulunan TAB ve WB parçalanma modelleri ile Nukiyama–Tanasawa dağılım fonksiyonunun Cradle CFD 2025.1 versiyonunda kurulum ayar sayfaları sırasıyla Şekil 7’den Şekil 15’e kadar ekran görüntüleriyle verilmiştir. Sprey analizi kurulumu, için ilk olarak Condition Wizard’da bulunan Analysis Type sekmesinde “Flow” (Turbulent flow) ve “Spray” seçenekleri işaretlenir. Bu seçimler akış alanındaki türbülanslı akış dinamiği ile püskürtülen damlacıkların parçalanma süreçlerini eş zamanlı olarak hesaplamalara dahil edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 7: Analiz tipinde spray modelin seçilmesi.

“Condition Wizard→ Basic Setting” menüsünde (Şekil 8) zamana bağlı analiz “Transient analysis”, uygun zaman adımı seçimleri yapılır ve yer çekimi hesaplamaya dahil edilir.



Condition Wizard

Set the basic parameters for the calculation.

Steady/Transient
☐ Steady-state analysis ☒ Transient analysis

Cycle
Parameters of time and cycle

Parameter	Value	Unit	Type
Last cycle	1000		
Type	Time step		
Time step	1e-05	s	
Set start time	Do not set		
Set stop time	Do not set		

Default temperature and unit setting
Default temperature: 20 C

Gravity
☒ Consider gravity

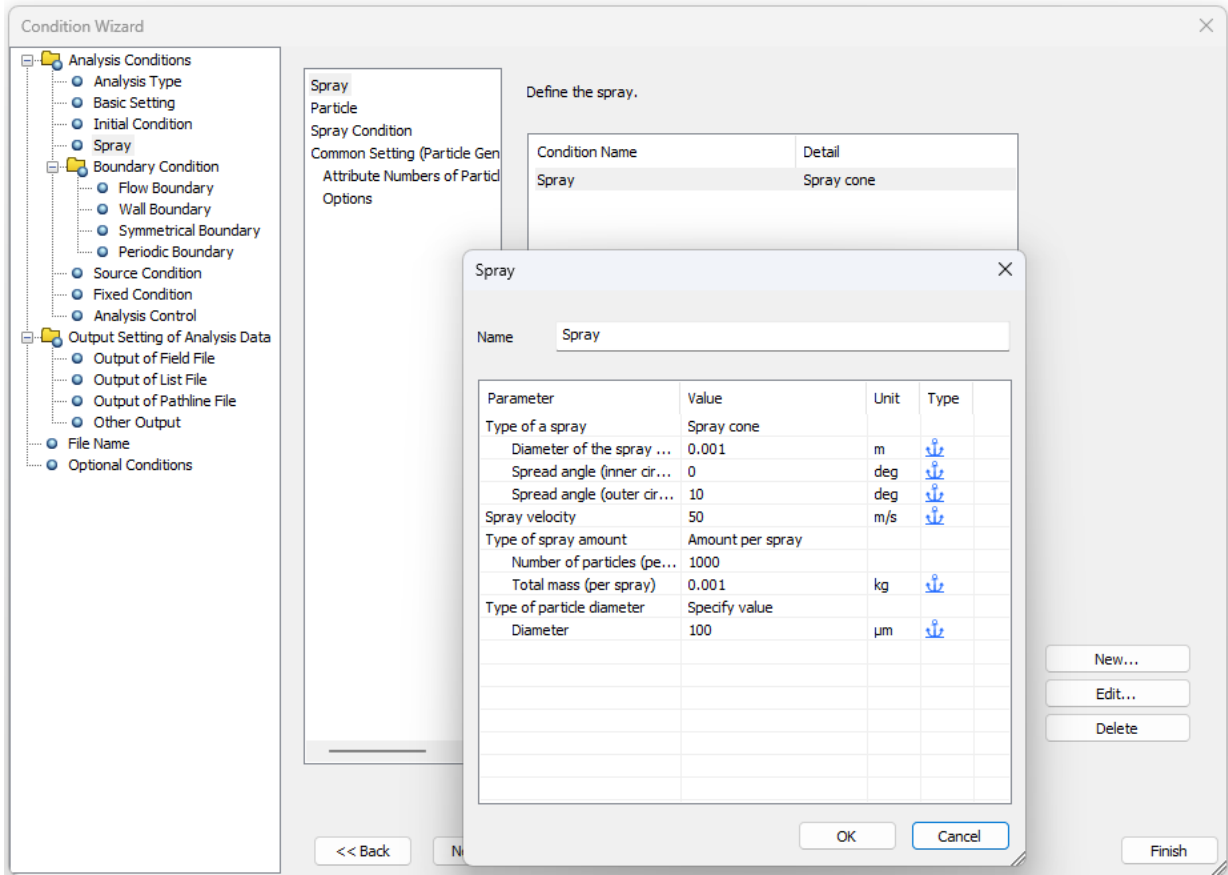
Direction: X=0 Y=0 Z=-1
Magnitude: 9.8 m/s2

Base Value... Buoyancy Setting...

<< Back Next >> Finish

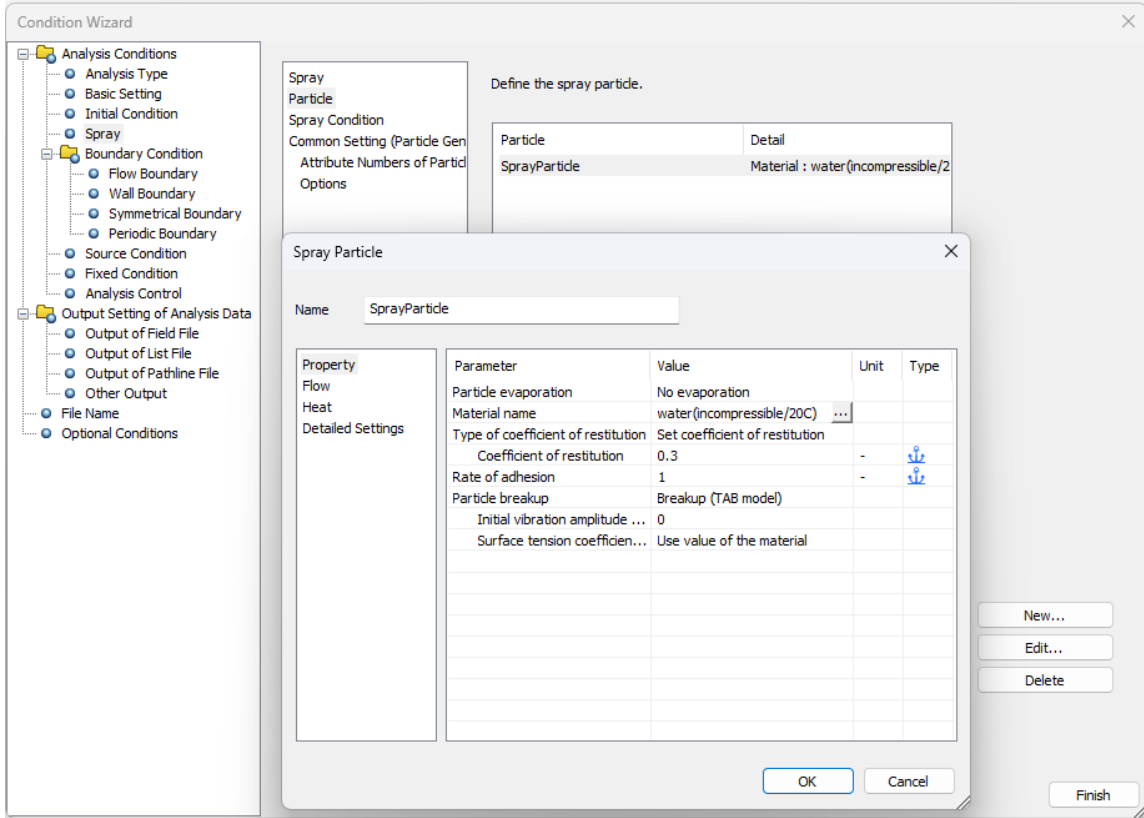
Şekil 8: “Basic Setting” menüsünde gerekli çözüm ayarlarının tanımlanması.

“Condition Wizard→ Spray→ Spray→ New” seçimleri yapılarak Spray sekmesine geçilir (Şekil 9) ve yeni bir sprey modeli tanımlanır. Bu aşamada belirli bir püskürtme damlacık çapı tanımlanır veya damlacık boyut dağılımının kullanıcı isterleri doğrultusunda tanımlanabilmesi için Nukiyama-Tanasawa dağılım fonksiyonunu aktifleştiren “Type of particle diameter→Nukiyama-Tanasawa distribution” seçimi yapılır. Şekil 6’da yer verilen ekranda Sauter ortalama çap, “Parameter α ” ve “Parameter β ” değerleri kullanıcı tarafından girilerek dağılımın şekli kontrol edilir.



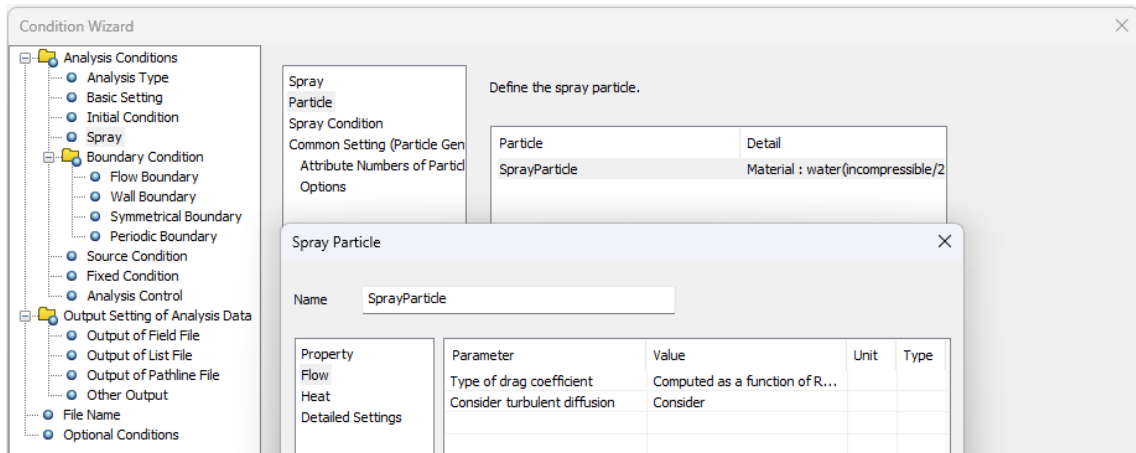
Şekil 9: Sprey özelliklerinin tanımlanması.

“Condition Wizard→ Spray→ Particle→ New” seçimi yapılır ve spreyn parçacık özellikleri Şekil 10’daki gibi tanımlanır. Damlacık parçalanma mekanizması için Şekil 2 ve Şekil 3’te detayları paylaşılan damlacık parçalanma mekanizması, kullanıcının isteri doğrultusunda “Particle breakup→ Breakup (TAB model)” veya “Breakup (WB model)” seçimleri yapılarak aktif edilir.



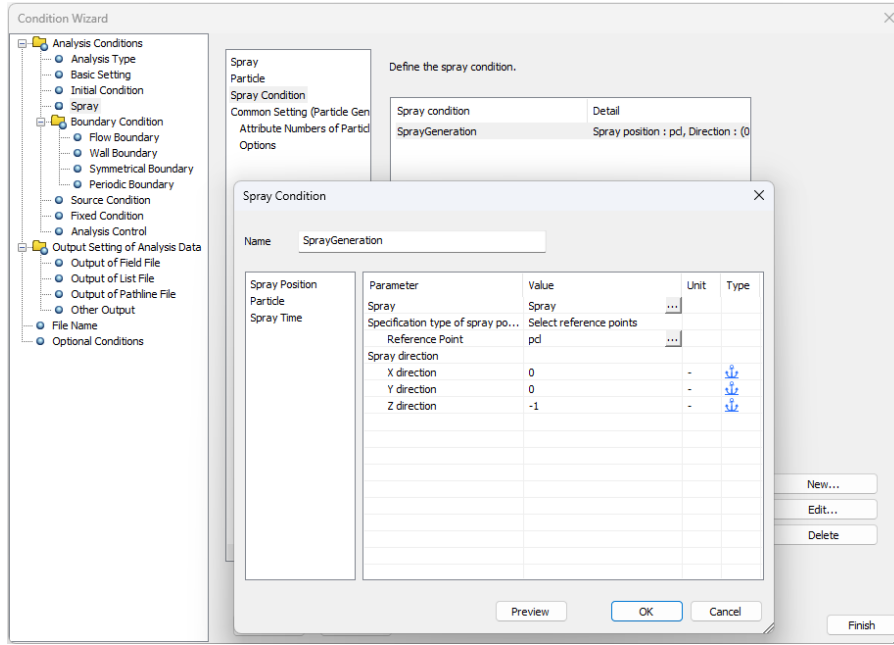
Şekil 10: Sprey parçacık özelliklerinin tanımlanması.

Özellikleri tanımlanan spre y parçacık menüsünden “Flow” sekmesine geçilerek (Şekil 11) türbülans etkilerinin analize dahil edilmesi için “Consider turbulent diffusion→ Consider” seçimi yapılır.

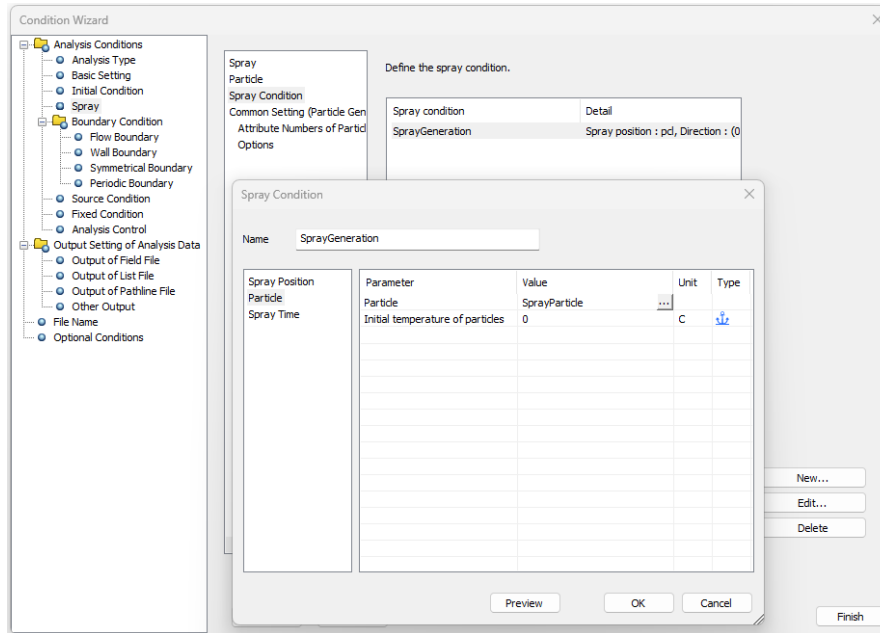


Şekil 11: Spre y parçacık akış özelliklerinin tanımlanması.

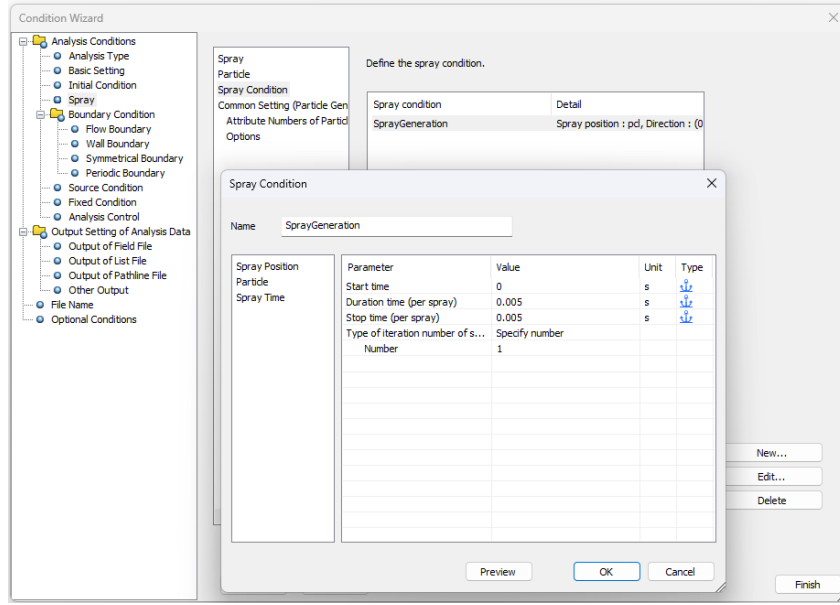
“Condition Wizard→ Spray→ Spray Condition→ New” seçimi yapılır ve spreyl konumu (Şekil 12), parçacık başlangıç sıcaklığı (Şekil 13) ve spreyl zamanlaması (Şekil 14) gibi sınır koşullar tanımlanır.



Şekil 12: Spreyl koşullarında spreyl konumunun “Spray Position” sekmesinde tanımlanması.

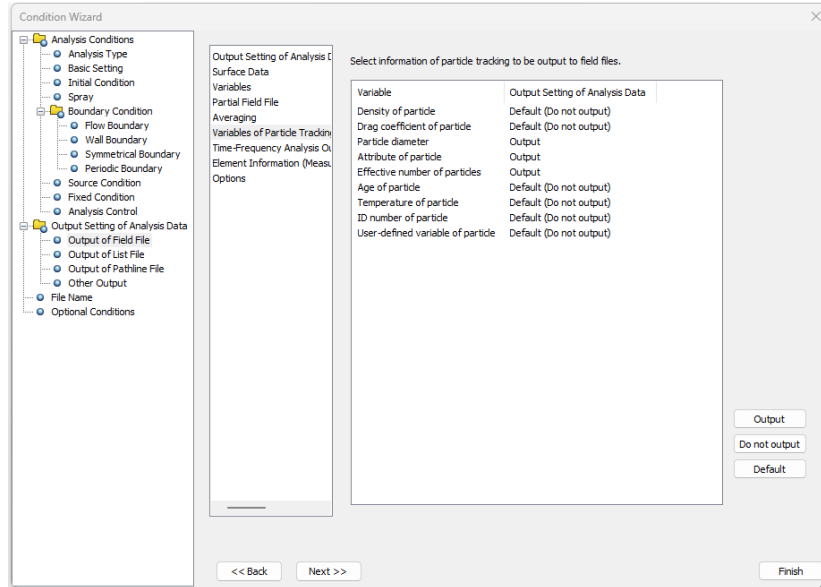


Şekil 13: Spreyl koşullarında başlangıç parçacık sıcaklığının “Particle” sekmesinde tanımlanması.



Şekil 14: Sprey koşullarında sprej süresinin “Spray Time” sekmesinde tanımlanması.

Spray model için gerekli bütün tanımlamaların ardından analiz sonuçlarında damlacığın fiziksel özelliklerini görüntüleyebilmek için “Condition Wizard→ Output of Field File→ Variables of Particle Tracking→ Particle Diameter + Attribute of Particle + Effective Number of Particles→ Output” seçimi yapılarak (Şekil 15) veri çıktıları aktif edilir.

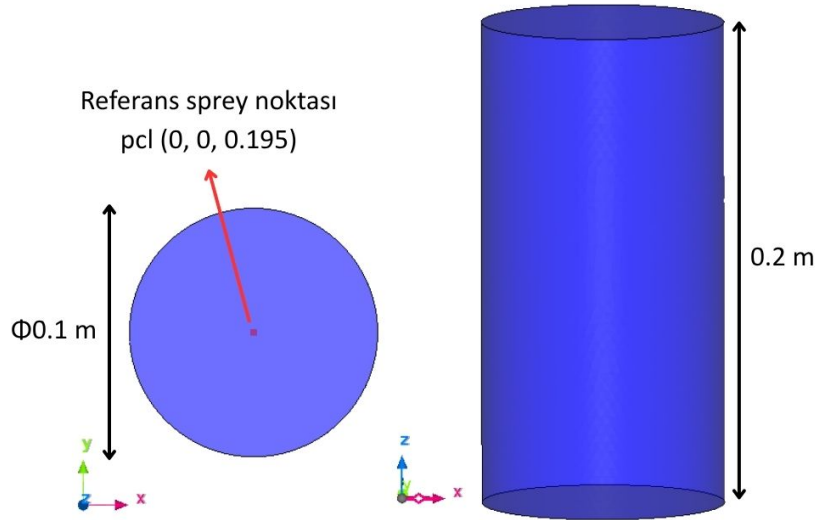


Şekil 15: Analizde hesaplanması istenilen parçacık özelliklerinin aktif edilmesi.

Yapılan yazılım ayarlamaları ile TAB, WB parçalanma modelleri ve Nukiyama–Tanasawa dağılım fonksiyonu Cradle CFD yazılımı simülasyon hesaplamalarına dahil edilerek sprej analizi hazır hale getirilmiştir. Bu yöntemler ile damlacık parçalanması ve sprej dağılımı etkin bir biçimde modellenip kontrol edilebilir. Ayrıca, bir sonraki başlıkta ele alınacak örnek analizlerin yürütülmesi için gerekli koşullar da bu simülasyon modeli ile sağlanmıştır.

3. ÖRNEK ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu başlık altında, TAB ve WB parçalanma modellerinin çalışma prensiplerini örneklendirilerek beraberinde NT analiz sonuçları sunulmuştur. Sprej analizleri, 0.1 m çapında ve 0.2 m yüksekliğindeki silindirik geometrili kontrol hacminde, Şekil 16’da gösterilmiş olan sprej püskürtme noktası referans alınarak gerçekleştirilmiştir. Damlacıklar, referans noktasından sabit hız ve belirlenmiş bir çap değeri ile püskürtülmektedir. Püskürtülen damlacıkların parçalanması TAB ve WB modelleri ile incelenmiş, daha sonra NT dağılım fonksiyonu ile damlacık çapları belirli bir aralıkta düzenli bir dağılım sergileyecek şekilde modellenmiştir.



Şekil 16: Analiz geometrisi [6].

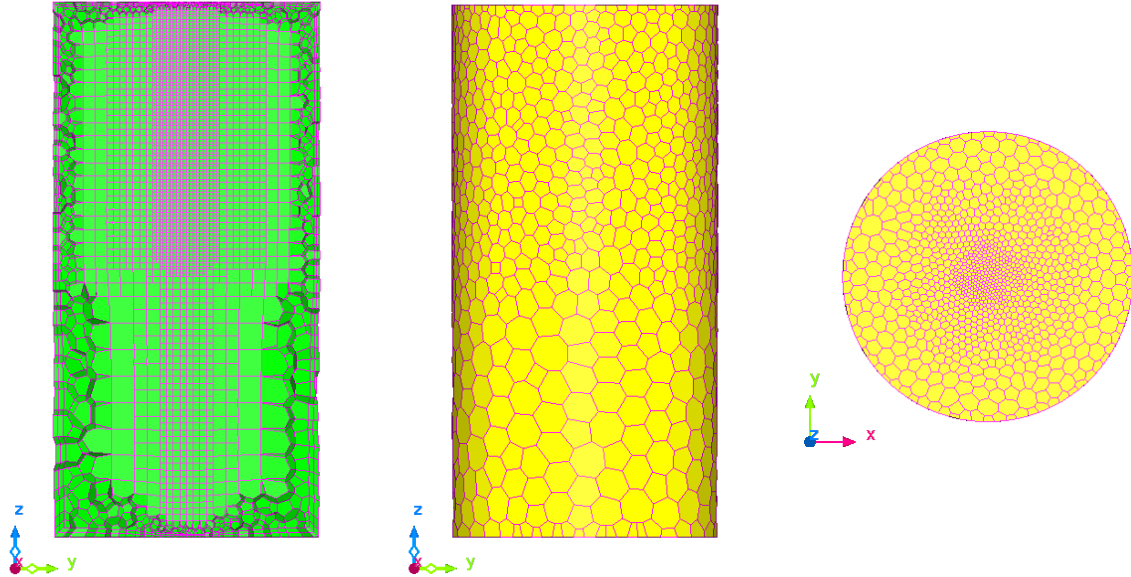
3.1. Sınır Koşulları ve Ağ Yapısı

Analizler, Cradle CFD 2025.1 ortamında Tablo 1’de tanımlanan sınır koşulları kullanılarak yürütülmüş, farklı parametre ve model değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Koni tipi sprej modeli ile püskürtülen su damlacıkları ile gaz fazı arasındaki bağıl hız $\Delta V = 50 \text{ m/s}$ olarak tanımlanmıştır. Sprej başına 1000 parçacık ve 0.001 kg toplam kütle tanımı yapılmıştır. Ayrıca, akışkanın türbülans etkileri “Consider turbulent diffusion” seçeneği etkinleştirilerek çözüme dahil edilmiş ve SST k- ω RANS türbülans modeli kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Sprej püskürtme süresi 0.005 s olarak alınmış, toplam analiz süresi olan 0.01 s içinde tek bir püskürtme incelenmiştir. Analiz sonuçları püskürtmenin tamamlandığı sprej süresi sonu olan 0.005 s’de paylaşılmıştır.

Tablo 1: Sprey ve Parçacık Özellikleri [6].

Sprey Parametreleri		Parçacık Parametreleri	
Sprey Tipi	Sprey Konisi	Parçacık Materyali	Su (Sıkıştırılmaz / 20C)
Sprey Hızı	50 m/s	Parçacık Çapı	0.001 m
Sprey Başına Parçacık Sayısı	1000	Akış	Türbülans etkisi çözüme dahil
Sprey Başına Toplam Kütle	0.001 kg	Yüzey Gerilim Katsayısı	0.0727 N/m

Cradle CFD yazılımının sunduğu çok yüzlü ağ elemanları ile hesaplama alanında toplam 92,880 düğüm noktası ve 57,208 ağ elemanı bulunmaktadır. Bu ağ yapısı, Şekil 17’de gösterildiği gibi sprej püskürtme alanını yeterli hassasiyetle temsil edecek yoğunlukta oluşturulmuştur.



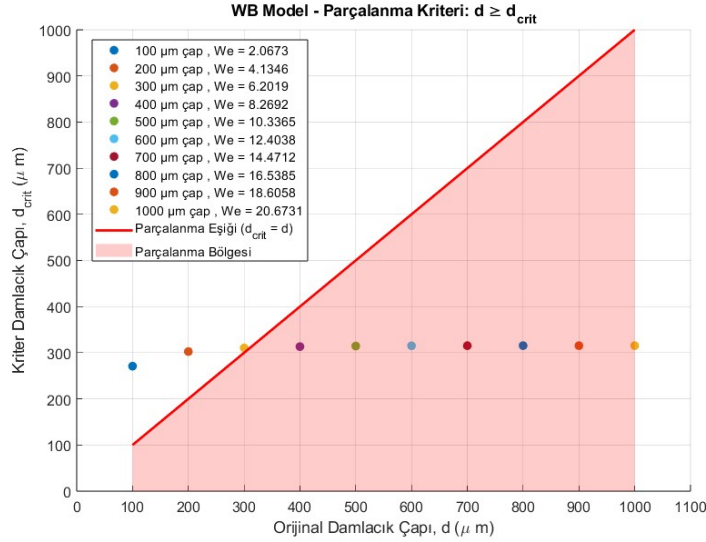
Şekil 17: Çok yüzlü (Polyhedral mesh) ağ yapısı.

3.2. Cradle CFD Analiz Sonuçları

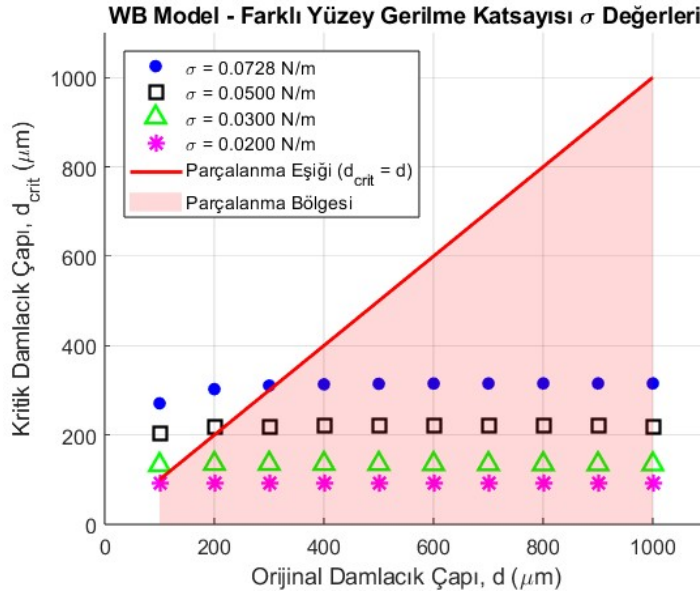
Analizlerde sırasıyla TAB model, WB model ve her iki modelin alt başlığı olarak Nukiyama-Tanasawa dağılım fonksiyonu ile ele alınmıştır. Bu modellerde sprej hızı (spray velocity), ilk salınım genliği (initial vibration amplitude), yüzey gerilme katsayısı (surface tension coefficient), damlacık çapı (particle diameter) parametreleri incelenmiş ve ilerleyen başlıklarda detayları sunulmuştur. Analizlerden önce parçalanma modelleri ve dağılım fonksiyonu matematik modelleri analitik olarak incelenmiş, elde edilen grafikler ilgili başlıklar altında sunulmuş ve HAD analiz sonuçları teorik altyapı ile desteklenmiştir.

3.2.1. WB Model

WB modelin teorik çalışmasında Denklem 2'den Denklem 7'ye kadar verilen fonksiyonlardan yararlanılmıştır. Parçalanma eşiği, Weber sayısı, farklı çap ve yüzey gerilme katsayısı değerleri dikkate alınarak grafikler oluşturulmuştur. Şekil 18'de görüldüğü üzere, artan damlacık çapı ile Weber sayısı da yükselmiş ve bu durum damlacıkların parçalanabilirliğini artırmıştır. Yüksek Weber sayıları, damlacıkların baskın aerodinamik kuvvetler altında daha kolay parçalanmasına neden olmaktadır.

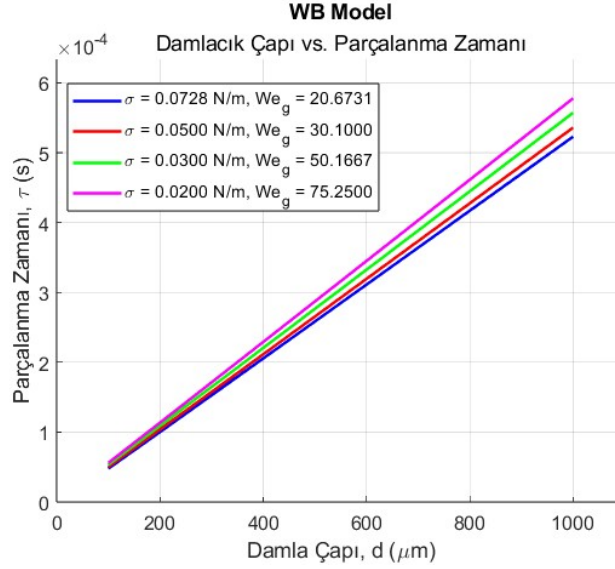


Şekil 18: WB modelde farklı parçacık çapları ve Weber sayısı.



Şekil 19: WB model ile farklı yüzey gerilim değerlerinde parçalanma.

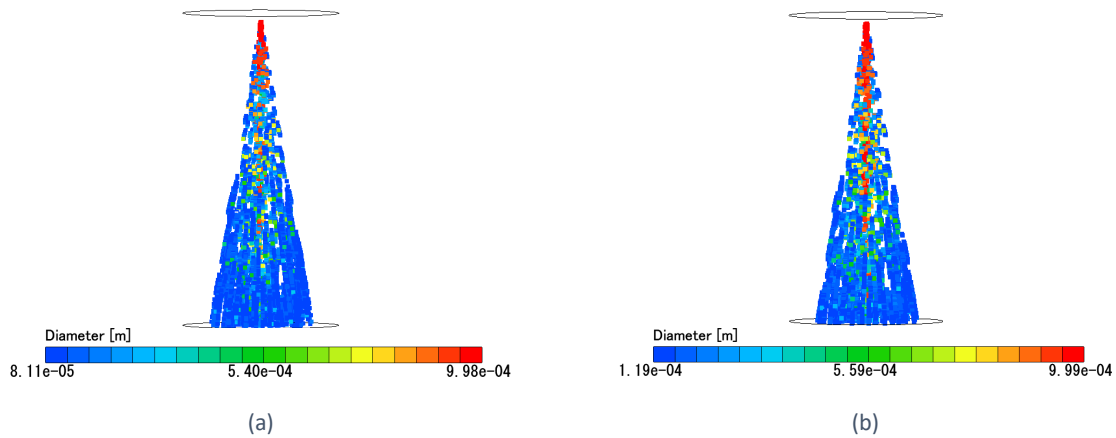
Şekil 19’da görüldüğü üzere, düşük damlacık çaplarında yüzey geriliminin etkisi belirginleşmekte ve yüksek yüzey gerilimi, damlacıkların parçalanabilme eğilimini azaltmaktadır. Bu durum, WB modelinde parçalanma dalga büyüklüğünün bastırılması ve Şekil 20’de görüldüğü üzere damlacıkların daha uzun süre kararlı kalması şeklinde etki göstermektedir.

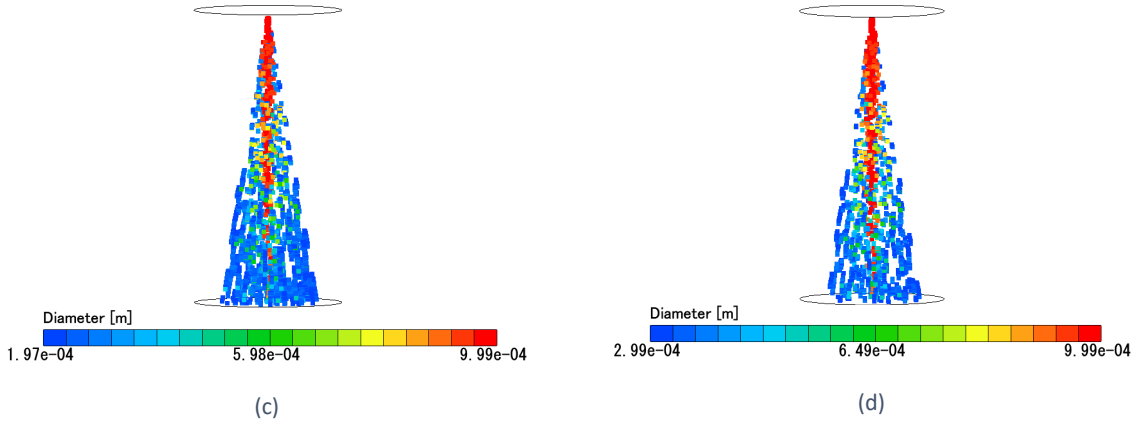


Şekil 20: WB model ile farklı yüzey gerilim değerlerinde parçalanma zamanı.

3.2.1.1. Yüzey Gerilme Katsayısı

Yüzey gerilme katsayısının WB modelindeki parçalanma davranışına etkisi teorik olarak incelenmiş, Cradle CFD yazılımında dört farklı yüzey gerilme katsayısı kullanılarak yürütülen HAD analizleri ile teorik çalışma desteklenmiştir. Şekil 21 incelendiğinde yüzey gerilme katsayısı ile parçalanma zamanı, Weber sayısı ve damlacığın parçalanma eğilimi ters orantılı olduğu görülmüştür. Yüzey gerilme katsayısının artması damlacıkların parçalanma miktarını azaltmaktadır.

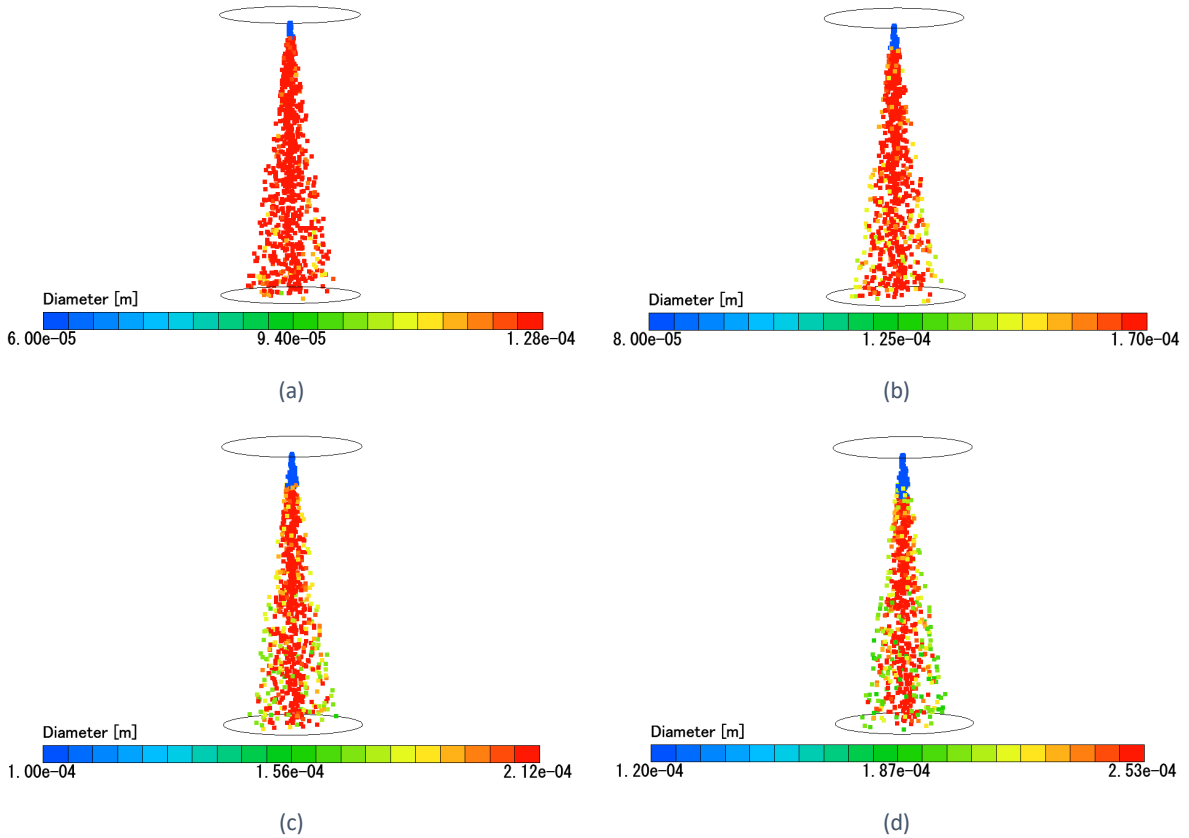




Şekil 21: WB modelde farklı yüzey gerilme katsayıları için parçacık dağılımı: (a) 0.02 N/m, (b) 0.03 N/m, (c) 0.05 N/m, (d) 0.0728 N/m.

3.2.1.2. Damlacık Çapı

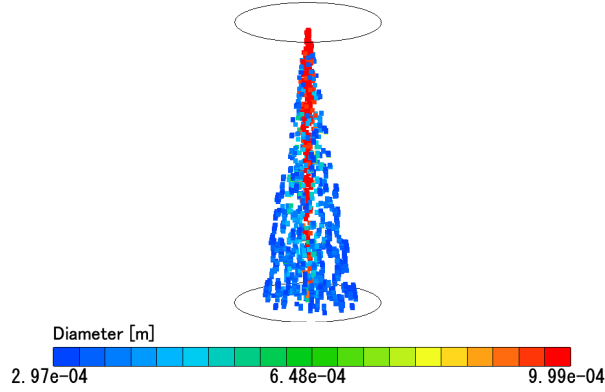
Damlacık çapının WB modeli üzerindeki etkisini incelemeye yönelik gerçekleştirilen dört analiz, Şekil 22’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Çap artışı, Weber sayısını yükselterek yüzey gerilimine karşı aerodinamik kuvvetlerin etkisini artırmakta ve damlacığın parçalanma eğilimini Şekil 18’de gösterildiği gibi güçlendirmektedir.



Şekil 22: WB modelde farklı damlacık çapları için parçacık dağılımı: (a) 60 µm, (b) 80 µm, (c) 100 µm, (d) 120 µm.

3.2.1.3. İlk Salınım Genliği

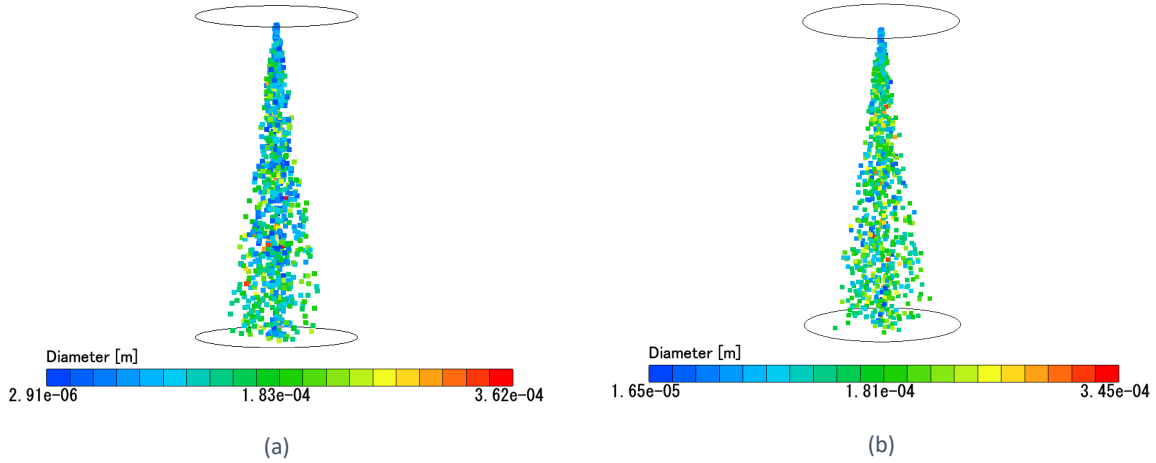
İlk salınım genliğinin WB modeli kapsamındaki parçalanma davranışına etkisini incelemek amacıyla dört farklı başlangıç genliği için analizler gerçekleştirilmiş ve tüm genlik değerlerinde Şekil 23’de sunulmuş olan birbiri ile örtüşen sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, WB modelinin damlacık parçalanmasını ilk salınım genliğinden bağımsız olarak modellediğini göstermektedir.

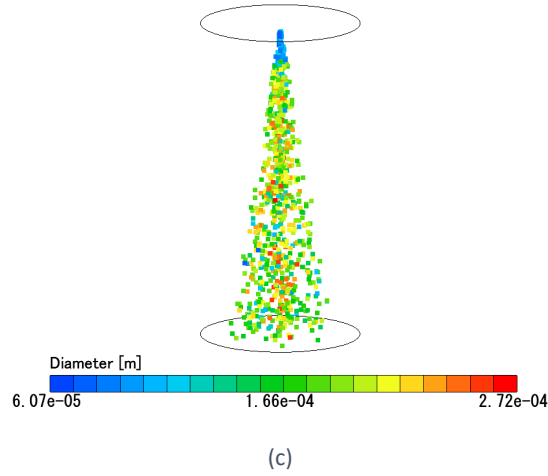


Şekil 23: WB modelde farklı ilk salınım genliği değerleri (0, 0.1, 10, 100) için parçacık dağılımı.

3.2.1.4. WB Model ve Nukiyama Tanasawa Dağılım Fonksiyonu

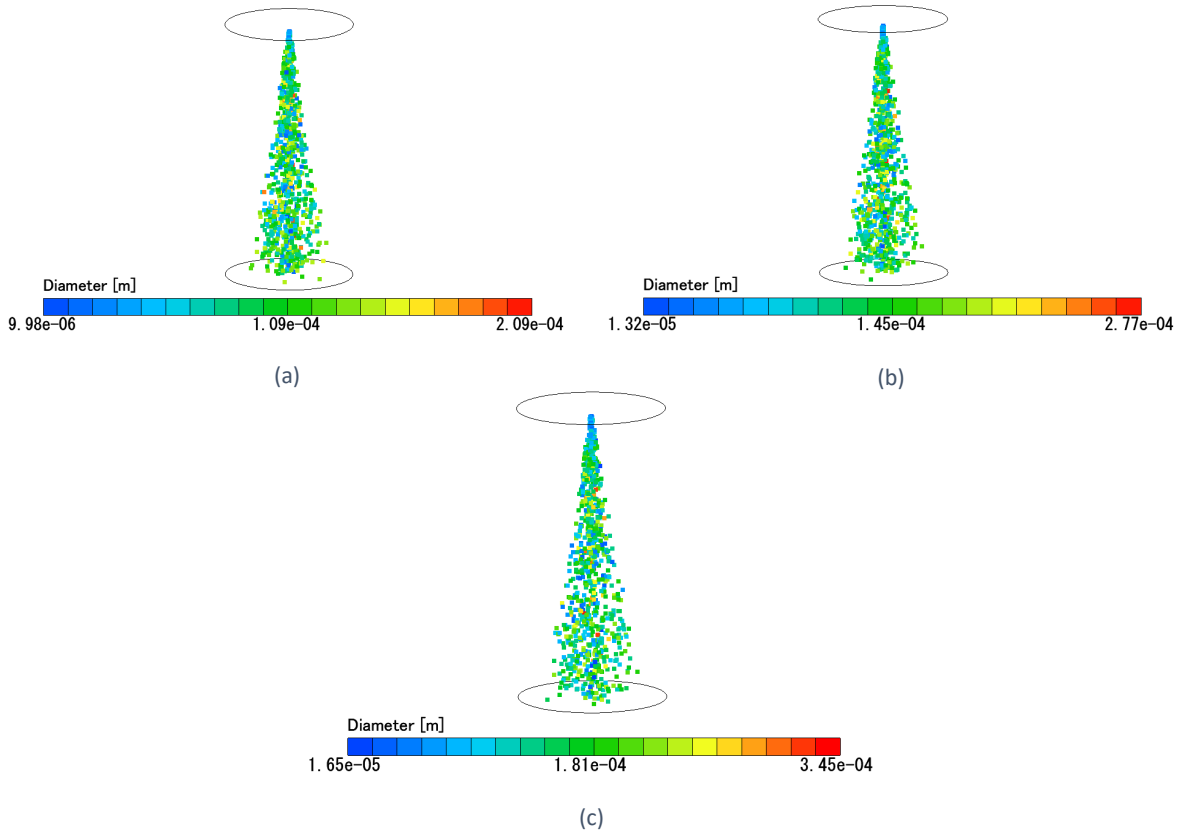
Bu çalışmada, 100 μm Sauter ortalama damlacık çapı esas alınarak üç farklı α ve β parametre seti için analizler gerçekleştirilmiş, sonuçları Şekil 24’de sunulmuştur. Dağılım fonksiyonunun WB modelinin öngördüğü damlacık boyut dağılımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.





Şekil 24: WB modelde farklı α ve β parametre setleri için parçacık dağılımı: (a) $\alpha = 0.62$, $\beta = 2.49$ [7], (b) $\alpha = 1.5$, $\beta = 3.5$, (c) $\alpha = 5$, $\beta = 10$.

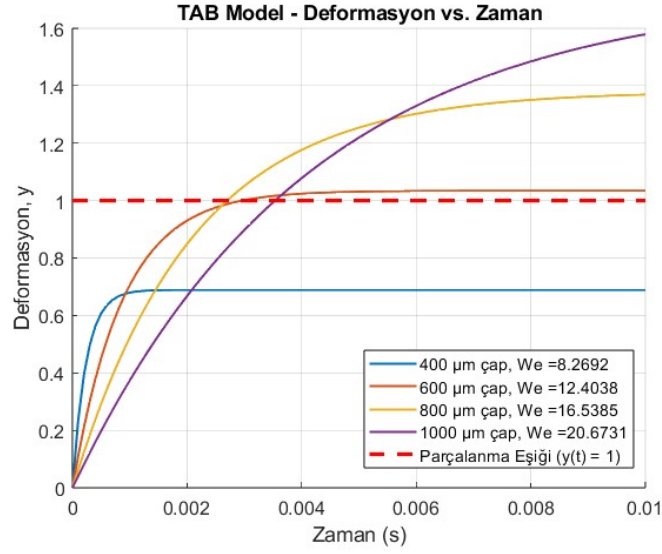
Nukiyama-Tanasawa parçacık dağılım fonksiyonu için, $\alpha = 1.5$ ve $\beta = 3.5$ değerleri sabit tutularak farklı Sauter ortalama çapları Şekil 25’de karşılaştırılmıştır. Analizler, farklı başlangıç damlacık boyutlarının dağılım fonksiyonu ve WB modeli ile simüle edilen parçalanma davranışı üzerindeki etkilerini incelemektedir.



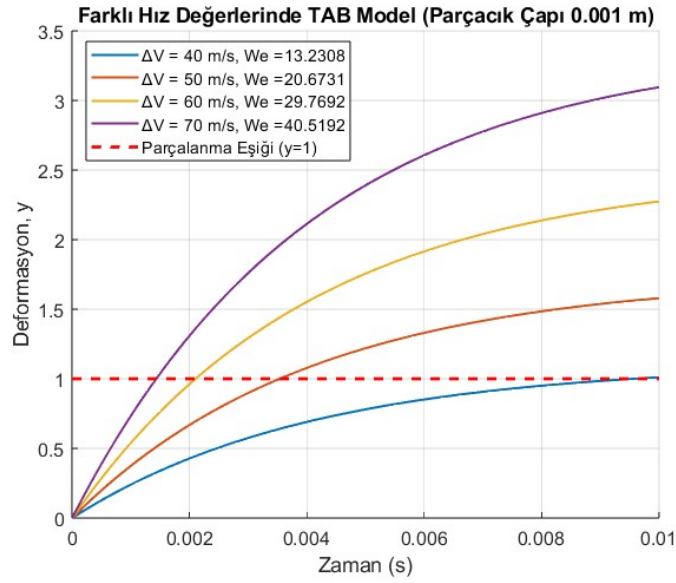
Şekil 25: WB modelde farklı Sauter ortalama çap değerleri için parçacık dağılımı: (a) 60 μm , (b) 80 μm , (c) 100 μm .

3.2.2. TAB Model

TAB modelin teorik incelemesi kapsamında, Denklem 8’de tanımlanan deformasyon fonksiyonu farklı çap ve hız değerleri için hesaplanarak, parçalanma eşiği grafiklerle irdelenmiştir.



Şekil 26: TAB model farklı çaplarda deformasyon ve parçalanma eşiği.

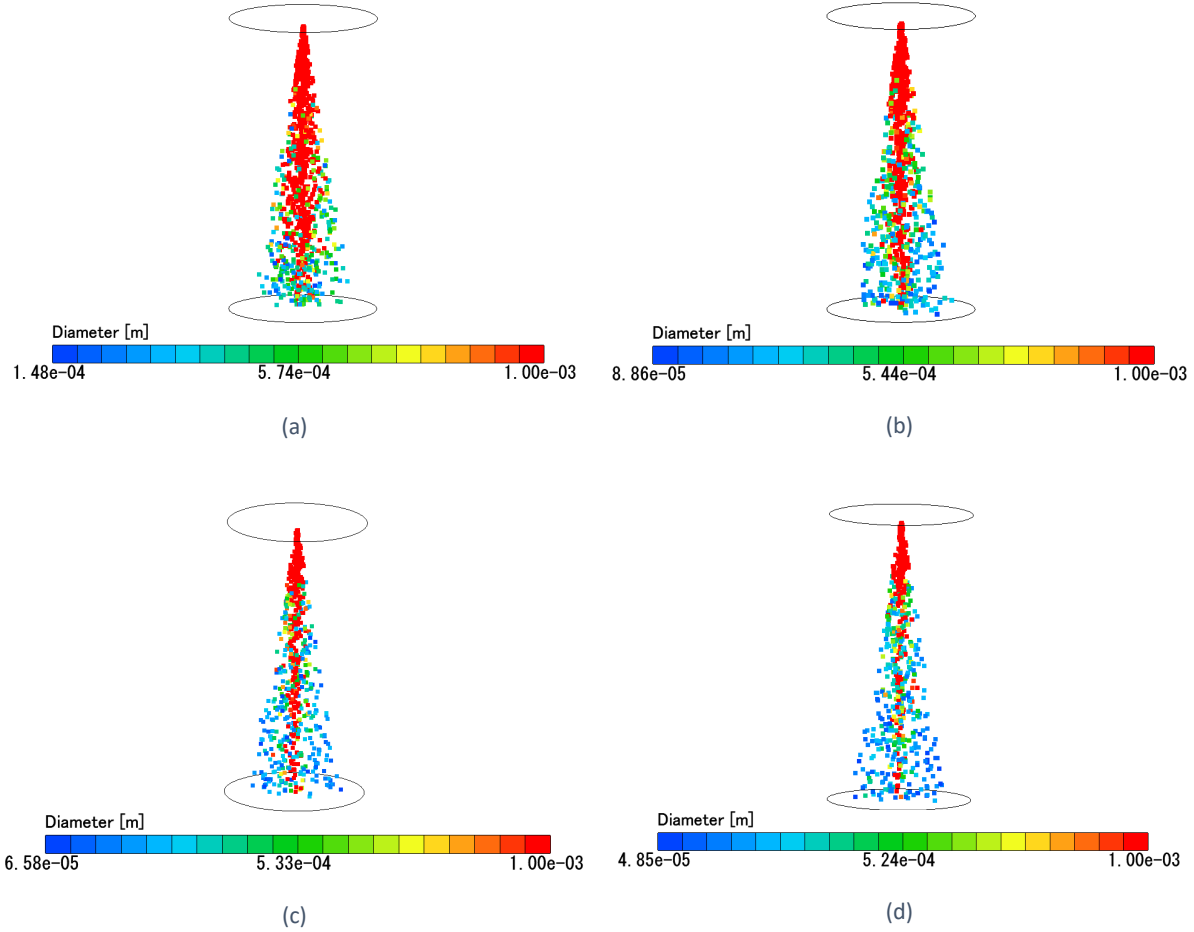


Şekil 27: Farklı hızlarda deformasyon ve parçalanma eşiği.

Şekil 26 ve Şekil 27’deki grafikler incelendiğinde, damlacık çapı veya spray hızındaki artış Weber sayısını yükselterek deformasyon değerini artırmakta ve deformasyon süresini kısaltmaktadır.

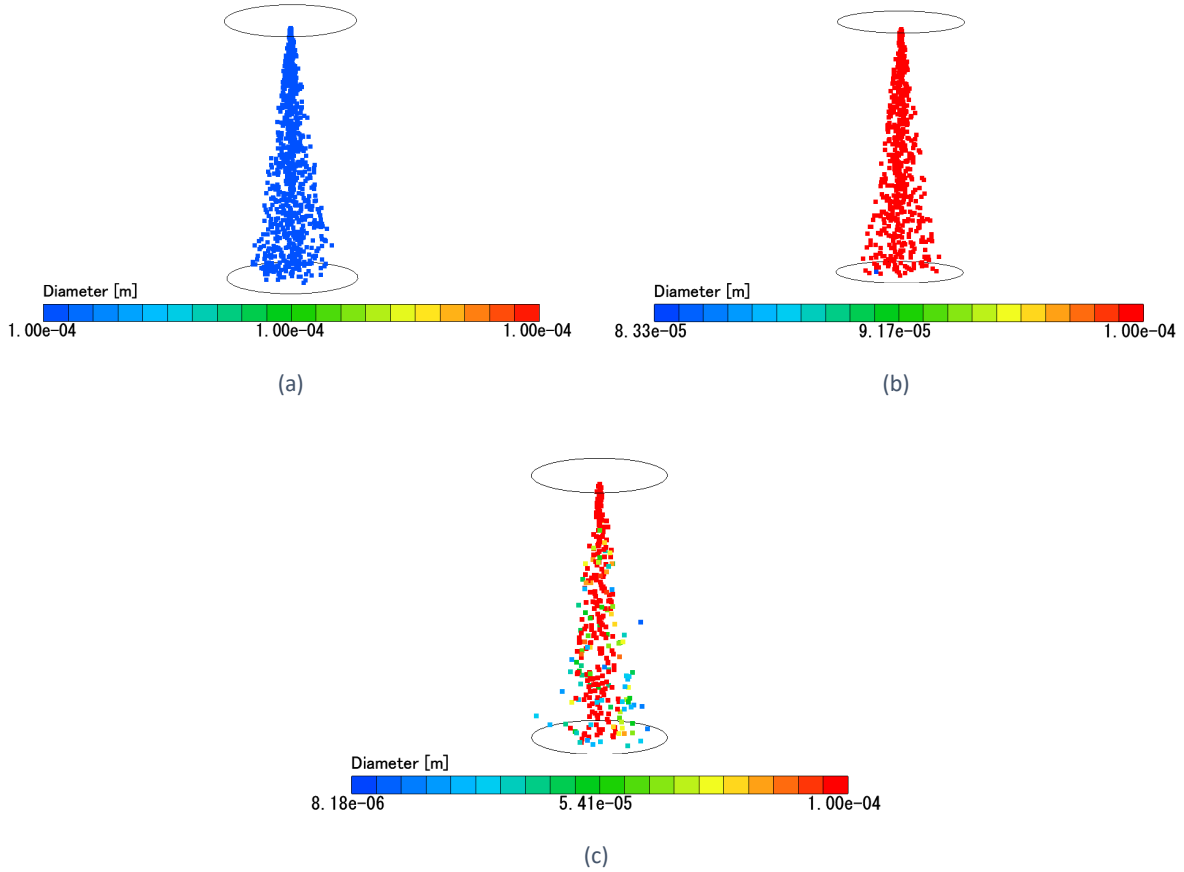
3.2.2.1. Sprey Hızı

Cradle CFD ortamında sınır koşulları Tablo 1’de verilen sprej modeli, dört farklı sprej hızı için TAB modeliyle analiz edilmiş ve sonuçlar, modelin sprej hızı değişimlerine duyarlılığını açıkça ortaya koymuştur. Sprej hızının artmasıyla daha fazla parçacığın parçalanma sürecine katıldığı ve oluşan ikincil damlacık boyut dağılımının genişlediği Şekil 28’de görülmektedir. Bu sonuç hızın, damlacık parçalanmasının dinamiklerini ve sprej dağılım karakteristiklerini belirgin şekilde etkilediğini doğrulamaktadır.



Şekil 28: TAB modelde farklı sprej hızları için parçacık dağılımı: (a) 40 m/s, (b) 50 m/s, (c) 60 m/s, (d) 70 m/s.

HAD tabanlı analizler, Şekil 27’de sunulan teorik çalışmayı doğrulayarak sprej hızının artmasıyla damlacık deformasyonu ve parçalanma miktarının doğru orantılı olarak arttığını göstermiştir. Bu karşılaştırma, 100 µm damlacık çapı esas alınarak üç farklı sprej hızında da tekrarlanmış ve Şekil 29 incelendiğinde benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

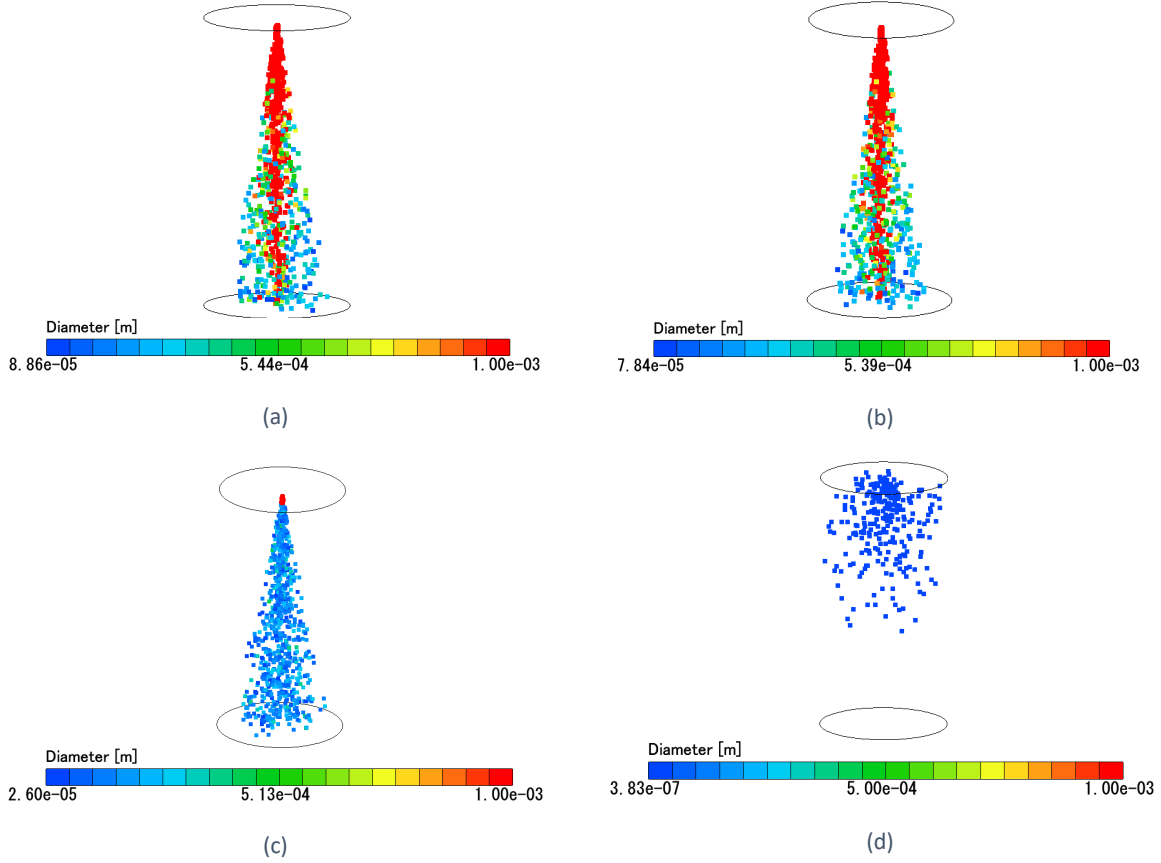


Şekil 29: TAB modelde 100 µm damlacık çapı için farklı spray hızlarında parçacık dağılımı: (a) 50 m/s, (b) 75 m/s, (c) 150 m/s.

TAB modeli kapsamında gerçekleştirilen spray hızı karşılaştırmalarına ek olarak, WB modelinde de hız artışı damlacıkların parçalanma eğilimini belirgin biçimde artırmıştır. Artan hız, her iki modelde de parçalanma süresini kısaltmış ve daha küçük çaplı ikincil damlacıkların oluşumunu sağlamıştır.

3.2.2.2. İlk Salınım Genliği

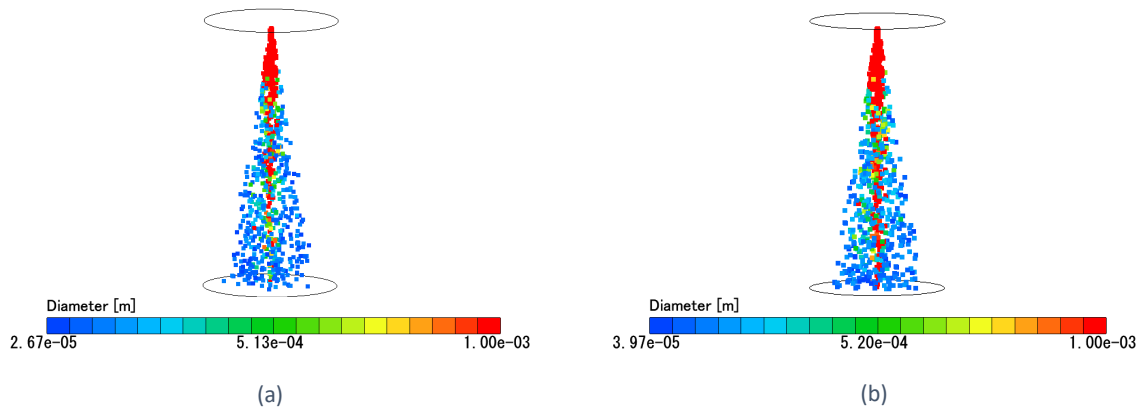
TAB modeli kullanılarak, ilk salınım genliğinin damlacık parçalanma sürecine etkisi dört farklı başlangıç genliği ile incelenmiştir. Şekil 30'da sunulan analiz sonuçları başlangıç genliği arttıkça parçalanma süresinin kısaldığını ve parçalanma oranının yükseldiğini göstermektedir. Bununla birlikte, Şekil 30 - (d) incelendiğinde genliğin aşırı artırılması spray modelinin dinamik davranışını bozabileceğinden, parçalanma sürecini doğru ve güvenilir biçimde öngörebilmek için uygun bir başlangıç genliği seçilmesi gerekmektedir.

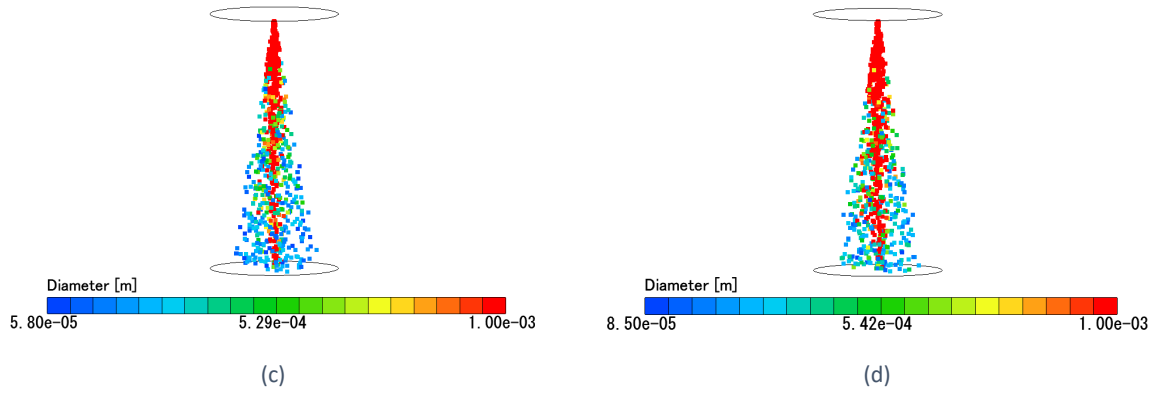


Şekil 30: TAB modelde farklı ilk salınım genlikleri için parçacık dağılımı: (a) 0, (b) 0.1, (c) 10, (d) 100.

3.2.2.3. Yüzey Gerilme Katsayısı

Parçalanma mekanizmasına yüzey gerilimi katsayısının etkisini incelemek amacıyla TAB modeli kullanılarak yapılan analizler Şekil 31’de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, yüzey gerilimi arttıkça damlacıkların parçalanma eğiliminin azaldığını ve parçalanma miktarının düştüğünü göstermektedir.

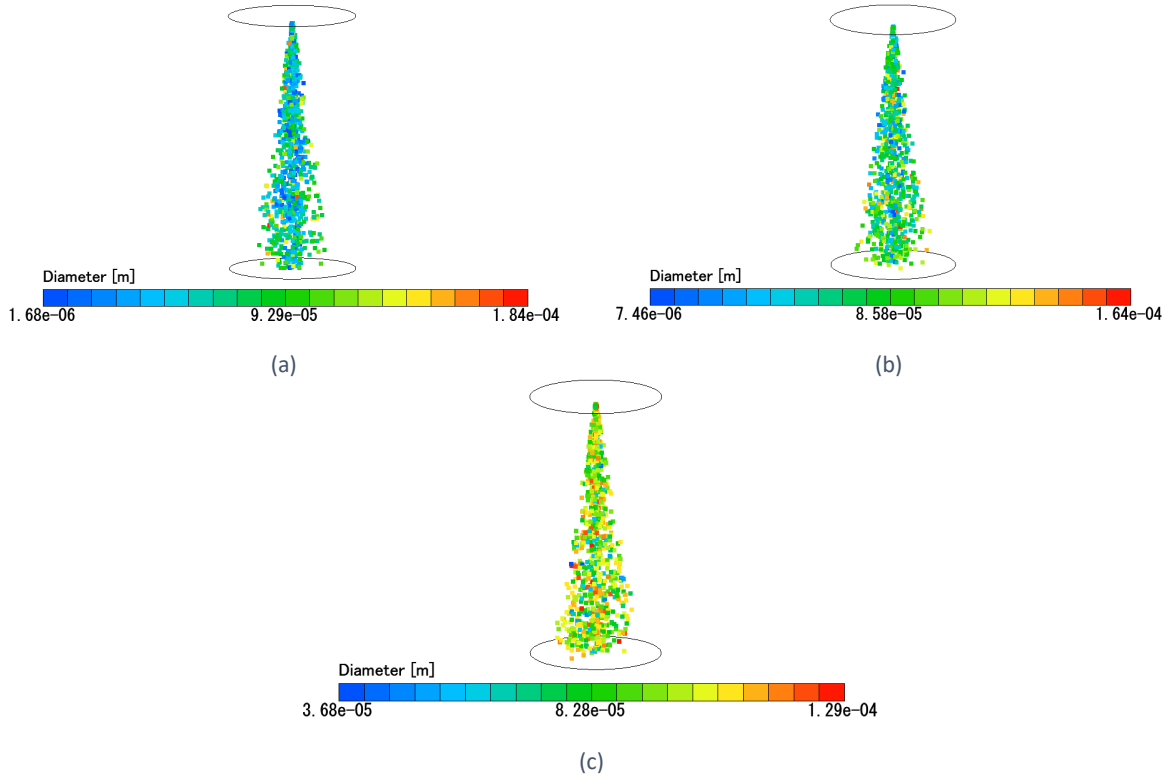




Şekil 31: TAB modelde farklı yüzey gerilim katsayıları için parçacık dağılımı: (a) 0.02 N/m, (b) 0.03 N/m, (c) 0.05 N/m, (d) 0.0728 N/m.

3.2.2.4. TAB Model ve Nukiyama Tanasawa Dağılım Fonksiyonu

Nukiyama-Tanasawa dağılım fonksiyonu, sprey damlacıklarının boyut dağılımını tanımlar ve parçalanma modelleri ile kullanıldığında parçalanma davranışını doğrudan etkiler. Bu çalışmada, 100 μm Sauter ortalama damlacık çapı esas alınarak üç set α ve β parametresi için analizler yapılmış ve dağılımın parçalanma sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir.

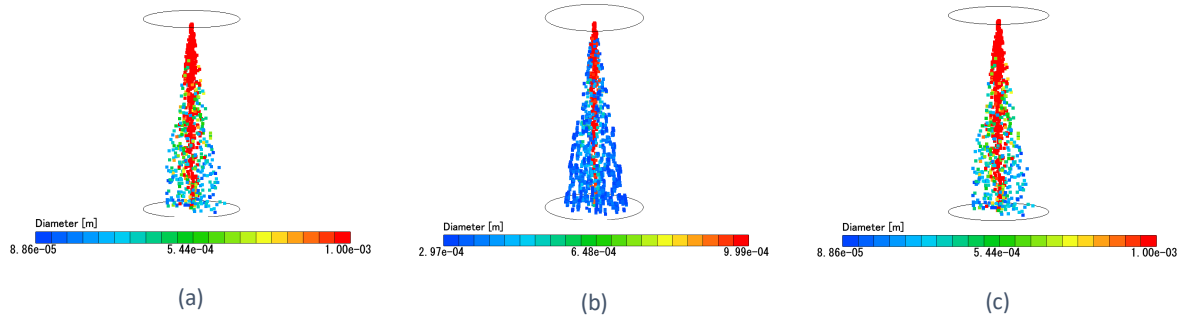


Şekil 32: TAB modelde farklı α ve β parametre setleri için parçacık dağılımı: (a) $\alpha = 0.62$, $\beta = 2.49$ [7], (b) $\alpha = 1.5$, $\beta = 3.5$, (c) $\alpha = 5$, $\beta = 10$.

Şekil 32 incelendiğinde, Şekil 4 ve Şekil 5’te teorik olarak gösterildiği gibi, α parametresinin artırılması damlacık dağılımını daha homojen ve öngörülebilir bir hale getirirken, β parametresinin artırılması ise dağılımın daha dar bir çap aralığında yoğunlaşmasına neden olduğu görülmüştür.

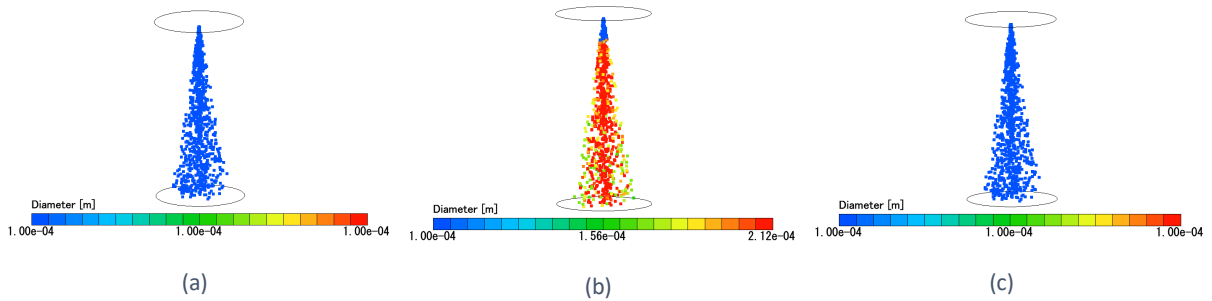
3.2.3. TAB + WB Model

Son olarak, her iki modelin beraber kullanıldığı TAB + WB modeli Tablo 1’de verilen sınır koşulları altında karşılaştırılmıştır. Damlacık çapı 0.001 m olarak esas alınan Şekil 33’de sunulmuş analizlerde, TAB + WB modelinin uygulanması sonucunda TAB modelin baskın olduğu ve elde edilen damlacık çapı dağılımının, yalnızca TAB modeli kullanılarak elde edilen aralıkla örtüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 33: Farklı parçalanma modellerinin karşılaştırılması: (a) TAB model, (b) WB model, (c) TAB + WB model.

Ayrıca, analizler damlacık çapı 100 μm esas alınarak tekrarlanmış ve Şekil 34’de görüldüğü gibi bu senaryoda da TAB modelinin baskınlığı açık bir biçimde doğrulanmıştır.



Şekil 34: Farklı parçalanma modellerinin 100 μm damlacık çapında karşılaştırılması: (a) TAB model, (b) WB model, (c) TAB + WB model.

4. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

Bu teknik yazıda, Taylor Benzetim Parçalanma (TAB) ve Dalga Parçalanma (WB) modellerinin formülasyonlarındaki karakteristik parametrelerin sprej parçalanma dinamiği ve damlacık boyutu dağılımı üzerindeki etkileri Cradle CFD yazılımında sistematik olarak incelenmiştir. Yazılımın kullanıcı dostu arayüzü, hızlı ağ oluşturma ve kolay model kurulum özellikleri, farklı parametrelerin etkilerini etkin bir şekilde değerlendirmeye imkan tanımıştır. HAD analiz sonuçları, birincil parçalanmanın WB modelinde tanımlanan Kelvin–Helmholtz kararsızlıklarıyla, ikincil parçalanmanın ise TAB modelinde öngörülen damlacık salınım ve deformasyon mekanizmalarıyla uyumlu bir şekilde gerçekleştiğini ortaya koymuştur.

Weber sayısının artışı, yüzey gerilimi etkisinin azalması veya aerodinamik kuvvetlerin hakimiyet kazanmasıyla ilişkilidir ve bu durum damlacıkların Rayleigh rejiminden tam atomizasyona geçiş sürecini hızlandırmaktadır. Bu nedenle, Weber sayısını belirleyen temel parametreler (sprej hızı, yüzey gerilimi katsayısı, damlacık çapı vb.) her iki modelde de benzer eğilimler sergilemiş, böylece model seçiminden bağımsız olarak tutarlı fiziksel sonuçların elde edildiği doğrulanmıştır.

Analizler, TAB modelin başlangıç genişliği parametresine duyarlı olduğunu, WB modelinin ise yüzey gerilimi gibi fiziksel parametrelerdeki değişimlerden daha fazla etkilendiğini göstermiştir.

Nukiyama–Tanasawa dağılım fonksiyonunun modele entegrasyonu, damlacık parçalanma sürecinin daha etkin biçimde gerçekleşmesini sağlamış ve böylece çap dağılımının kullanıcı istekleri doğrultusunda belirli bir aralıkta daha homojen şekilde kontrol edilebilmesine olanak tanımıştır. Püskürtme sırasında damlacıkların Sauter ortalama çapın (SMD) etrafındaki boyut aralığı, β parametresiyle tanımlanırken α parametresi dağılım eğrisinin simetrisini, homojenliğini ve yoğunluk profilini belirlemektedir.

TAB + WB modelinin incelenmesi, özellikle çalışma kapsamında ele alınan koşullar altında parçalanma mekanizmasının belirleyici unsuru olarak TAB modelinin öne çıktığını göstermektedir. Dolayısıyla, ikincil parçalanma modellenmesinde oldukça yaygın kullanılan TAB modelinin tek başına kullanımı, mühendislik uygulamaları açısından çoğu durumda yeterli, güvenilir ve hesaplama açısından verimli bir yaklaşım sunmaktadır.

Sprej parçalanma süreçlerinin modellenmesi ve damlacık boyutu dağılımının istenen performans kriterleri çerçevesinde kontrol edilebilmesi yazılımın mühendislik tasarım süreçlerinde sağladığı kritik katkıları göstermektedir. Özellikle, test altyapısı ve deneysel süreçlerin zaman ve maliyet açısından kısıtlayıcı olduğu durumlarda, Cradle CFD'nin sunduğu HAD çözümleri, tasarımın olgunlaştırılması ve parametre etkilerinin öngörülmesi açısından yüksek verimlilik sağlamaktadır.

5. REFERANSLAR

- [1] Von Helldorff, H., & Micklow, G. J. (2019). Primary and secondary spray breakup modelling for internal combustion engine applications. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 6(4), 9882–9887. <https://www.jmest.org/wp-content/uploads/JMESTN42352901.pdf>
- [2] CFD Land. (2024). Introduction to DPM breakup models. CFD Land. <https://cfdland.com/introduction-to-dpm-breakup-models/>
- [3] CRADLE CFD scFLOW User's Guide Analysis Method, 2025.
- [4] Taş, İ. (2019). Direkt püskürtmeli benzinli motorlarda kısmi yükte çalışmada karışım oluşumunun nümerik incelenmesi. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/direkt-püskürtmeli-benzinli-motorlarda-kismi/docview/2637398404/se-2>
- [5] Van Esch, S. J. A. (2022). *Comparison of breakup models for the secondary breakup in gas atomization* [Bachelor's end project report, Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering].
- [6] CRADLE CFD scFLOW User's Guide Exercise, 2025.
- [7] Urbán, A., & Józsa, V. (2018). Investigation of fuel atomization with density functions. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 62(1), 33–41. <https://doi.org/10.3311/PPme.11312>