



DAMLACIK SAYISI VE DAMLACIKLAR ARASI YATAY MESAFENİN MAKSİMUM YAYILMA ALANI VE ISI TRANSFERİ PERFORMANSI ÜZERİNE ETKİLERİNİN SAYISAL İNCELENMESİ

Ahmet GÜLTEKİN*, Nejdet ERKAN**, Üner ÇOLAK*** ve Shunichi SUZUKI****

*İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi - Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul/Türkiye
ahmet.gultekin@istun.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1307-9016

**United Kingdom Atomic Energy Authority, Rotherham/UK
nejdet.erkana@ukaea.uk, ORCID: 0000-0001-9868-4305

***İstanbul Teknik Üniversitesi - Enerji Enstitüsü, İstanbul/Türkiye
unercolak@itu.edu.tr, ORCID: 0000-0001-9293-6065

****The University of Tokyo - Department of Nuclear Engineering and Management, Tokyo/Japan
s_suzuki@n.t.u-tokyo.ac.jp, ORCID: 0000-0001-8441-5999

(Geliş Tarihi: 23.06.2022, Kabul Tarihi: 28.03.2023)

Özet: Damlacıkların katı bir yüzeye etki etmesi fenomeni çok sayıda endüstriyel uygulamalarda görülebilir. Damlacıkların sıcak bir yüzeye ve/veya diğer damlacıklarla etkileşimleri durumunda bu fenomen daha karmaşık hale gelmektedir. Katı bir yüzeye çok sayıda damlacık çarptığında, damlacıkların çarpma koşulları ve aralarındaki mesafeye bağlı olarak bir etkileşim meydana gelir. Bu etkileşim nedeniyle bir katman yükselmesi oluşur ve yüzeyde damlacık başına daha az yayılma gerçekleşir. Dolayısıyla, ortaya çıkan hidrodinamik ve ısı transferi değişimleri tek damlacık etkileşimlerinden oldukça farklıdır. Sprey soğutma olgusunda meydana gelen fiziksel mekanizmaları anlama ve modelleme ile ilgili zorluklar, damlacıkların rastlantısallığından ve izlenemez davranışlarından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, karmaşık yapı basitleştirilerek çoklu damlacıkların etkileşimleri sıvıların hacmi (VOF) metodu kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın amacı, damlacık sayısının ve damlacık çarpma koşullarının yüzeyden gerçekleşen ısı transferi performansına etkisini incelemektir.

Anahtar Kelimeler: Çoklu damlacık etkileşimleri, ısı transfer performansı, sprey soğutma, VOF metodu.

NUMERICAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DROPLET NUMBER AND HORIZONTAL DISTANCE ON MAXIMUM SPREADING AREA AND HEAT TRANSFER PERFORMANCE

Abstract: The phenomenon of droplets impact on a solid surface can be seen in many industrial applications. This phenomenon becomes more complex when droplets interact with a hot surface and/or other droplets. After multiple droplet impingement on a solid surface, an interaction occurs depending on the impact conditions of the droplets and the distance between them. This interaction leads to an uprising layer which causes lesser spreading area per droplet on solid surface. The hydrodynamic outputs and heat transfer activities of the droplets are very distinct from single droplet cases due to this interaction. Difficulties in understanding and modeling the physical mechanisms that take place in the spray cooling phenomenon arise from the randomness and untraceable behavior of the droplets. Therefore, the complex structure has been simplified and the interactions of multiple droplets have been numerically investigated using the volume of fluid (VOF) method. The aim of this study is to examine the effect of droplet number and droplet impact conditions on the heat transfer performance from the surface.

Keywords: Multiple droplet interactions, heat transfer performance, spray cooling, VOF method.

SEMBOLLER

A Yayılma alanı [m^2]

\bar{A} Boyutsuz yayılma alanı [$= \frac{A}{ND_0^2}$]

D_0 İlk damlacık çapı [mm]

d_h Damlacıklar arası yatay mesafe [mm]

\bar{d}_h Boyutsuz yatay mesafe [$= d_h / D_0$]

d_v Damlacıklar arası dikey mesafe [mm]

\bar{d}_v Boyutsuz dikey mesafe [$= d_v / D_0$]

D_s Yayılma çapı [mm]

H_s Katman yüksekliği [mm]

\bar{H}_s Boyutsuz katman yüksekliği [$= H_s / D_0$]

N Damlacık sayısı

q'' Isı akısı [W/m^2]

T Sıcaklık [$^{\circ}C$]

t zaman [s]

U_0 Damlacık başlangıç hızı [m/s]

We Weber sayısı [$= \rho u_0^2 D_0 / \sigma$]

α	VOF hacim oranı
β	Boyutsuz yayılma çapı [=D _s / D ₀]
μ	Dinamik viskozite [Ns/m ²]
ρ	yoğunluk [kg/m ³]
σ	Yüzey gerilimi [N/m]
τ	Boyutsuz zaman [= tu ₀ /D ₀]

GİRİŞ

Katı bir yüzeye damlacık çarpması olgusu, mürekkep püskürtmeli yazıcı (Castrejón-Pita *vd.*, 2008; de Gans *vd.*, 2004), içten yanmalı motorlarda yakıt enjeksiyon işlemi (Panão ve Moreira, 2005), sprej kaplama (Pasandideh-Fard *vd.*, 2002; Soltani-Kordshuli ve Eslamian, 2017) ve sprej soğutma sistemleri (Bostanci *vd.*, 2012; Cheng *vd.*, 2015; Mehdizadeh ve Chandra, 2006; Shahmohammadi *vd.*, 2018; Silk *vd.*, 2006) gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda görülebilir. Literatürde, tek damlacık ile ısıtılmış katı yüzey etkileşimleri hakkında çok sayıda deneysel (Akao *vd.*, 1980; Breitenbach *vd.*, 2017; Hatakenaka *vd.*, 2019; Jung *vd.*, 2016; Lee *vd.*, 2020; Pasandideh-Fard *vd.*, 2001; Tran *vd.*, 2012; Tran *vd.*, 2013) ve sayısal çalışmalar (Margarinos *vd.*, 2014; Nikolopoulos *vd.*, 2007; Pournaderi ve Pishevar, 2012; Reyhanian *vd.*, 2017; Taghilou ve Hassan, 2014; Villegas *vd.*, 2016; Z. Wang *vd.*, 2016; Xiong ve Cheng, 2018) bulunmaktadır. Damlacıkların sıcak yüzeylere çarpmasıyla ilgili güncel çalışmalar hakkında ayrıntılı bilgiler Liang ve Mudawar (2017) tarafından yapılan kapsamlı derleme makalesinde bulunmaktadır.

Yüzey sıcaklığı, hem damlacık dinamiklerini hem de ısı transfer performansını etkilemekte hayati bir rol oynamaktadır. Ayrıca, yayılma alanı miktarı sıvı lamel ile yüzey arasındaki temas alanını belirler, bu yüzden sprej soğutma sırasında ısı transferini etkileyen diğer önemli bir parametredir. Yayılma alanı, damlacık çarpmasının başlangıç kinetik enerjisi ve viskoz yayılmadan kaynaklanan enerji kayıpları ile yüksek oranda ilişkilidir. Damlacık çarpmasının kinetik enerjisi, yüzeye temasın ilk aşamalarında sıvının radyal hareketine dönüştürülür. Damlacık yüzey boyunca genişlediğinde, damlacığın kinetik enerjisi viskoz kuvvetler tarafından kısmen dağılır. Sonunda, damlacık maksimum yayılma alanına ulaştığında, yüzey gerilimi deformasyonun neden olduğu arayüz enerjisinde sıvının kalan kinetik enerjisini biriktirerek genişlemeyi yavaşlatır. Bu noktada, damlacık dairesel bir lamel şeklini alarak maksimum yayılma alanına ulaşır. Birçok araştırmacı, damlacığın maksimum yayılma çapını sayısal yöntemler veya enerji dengesini kullanarak tahmin etmeye çalışmıştır (Clanet *vd.*, 2004; Huang ve Chen, 2018; Ukiwe ve Kwok, 2005).

Diğer damlacıklarla etkileşim varsa bu durum daha karmaşık hale gelir. Ancak, literatürde çoklu damlacık etkileşimleri ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Cossali *vd.* (2003), sıcak yüzey üzerinde eşzamanlı üçlü damlacık çarpmasından sonraki damlacık etkileşimlerini incelemek için deneyler yapmıştır. Buhar

kabarcıklarının büyümesinin ve ayrılmasının, geçiş kaynama rejiminde çok sayıda küçük ikincil damlacıklara neden olduğunu belirtmişlerdir. Başka bir çalışmada, Cossali *vd.* (2005), sıcak yüzeylere çoklu damlacık çarpması için yüzey malzemesinin ikincil damlacık atomizasyonu üzerindeki etkilerini araştırdı. İkincil damlacık morfolojisinin yüzey malzemesinden güçlü bir şekilde etkilendiğine dikkat çektiler. Ersoy ve Eslamian (2020), farklı renklerde sıvılar kullanarak kuru ve ıslak yüzeylere yüksek Weber sayısına sahip damlacık çiftleri uygulayarak damlacıklar arası oluşan etkileşim nedeniyle oluşan katman yüksekliğinin zamanla değişimini deneysel olarak incelediler. Katı yüzeye damlacık çifti etkisi uygulandığında üç farklı tip katman yükselmesi formu gözlemlenildi. Liang *vd.* (2019) ortam sıcaklığında eşzamanlı olmayan ve eşzamanlı durumlar için damlacık çiftini deneysel olarak araştırdılar. Eşzamanlı olmayan durumları etkileşim türüne göre üç ana alt duruma ayırdılar. Gültekin *vd.* (2021) aynı anda birden fazla damlacık elde etmek için bir damlacık üretim ve kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri bu deney düzeneği ile Shadowgraph yöntemini kullanarak farklı çarpma koşullarına ve konfigürasyonlara sahip tek ve çoklu damlacıkların ısıtılmış yüzeylerle etkileşimlerini incelemişlerdir. Katman yüksekliğinin, damlacıklar arası mesafe azaldıkça ve damlacık Weber sayısı arttıkça arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, damlacıklar arası yatay mesafenin artmasıyla, yayılan sıvı lameller viskoz kuvvetlere karşı daha fazla enerji kaybettiğinden dolayı zayıf bir katman yükselmesinin oluşmasına neden olduğunu vurgulamışlardır. Başka bir çalışmada, Gültekin *vd.* (2020) parçacık görüntü hız ölçümü (PIV) ve gölge grafiği (Shadowgraph) yöntemlerini eş zamanlı olarak kullanmıştır. PIV yöntemi ile farklı sıcaklıklarda safir cam üzerinde damlacıkların içindeki radyal hız değişimi incelenmiştir. Radyal hız değişiminin, nispeten geniş bir yayılma yarıçapı aralığında doğrusal olduğu gözlemlenmiştir. Ancak zamanla kılcal ve viskoz kuvvetlerin etkisiyle, radyal hız profiline dış bölgelerinde nonliner şekil aldığı gözlemlenmiştir. Ek olarak damlacık çifti içindeki yayılma hızları, PIV yöntemi kullanılarak ortam sıcaklığında incelenmiştir. Etkileşim bölgesinde yukarı doğru bir akış nedeniyle oluşan katman yükselmesinin ekstra bir durgunluk noktasına neden olduğu gözlemlenmiştir.

Nümerik olarak yapılan çoklu damlacık araştırmalarının çoğunda, Lattice Boltzmann, Level Set ve Volume of Fluid (VOF) gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Li *vd.* (2016) bir Lattice Boltzmann modeli kullanarak sıvı film üzerindeki yatay ve dikey mesafelere sahip damlacık çifti etkisini inceledi. Eşzamanlı olmayan damlacık çiftlerinin etkileşimi nedeniyle oluşan katman yüksekliğini ve yönünü değiştirerek asimetriye neden olacağını belirtmişlerdir. Wang *vd.* (2018) akan bir sıvı film üzerine eşzamanlı bir damlacık çifti çarpmasıyla ısı transfer davranışını sayısal olarak araştırdı. Asimetrisinin daha önemli hale geldiğini ve damlacıklar arasındaki mesafe kısaldıkça çarpma alanındaki ısının uzaklaştırılmasının daha belirgin olduğunu gösterdiler.

Liang *vd.* (2018) ısı transferi sürecini dikkate almadan sıvı film üzerine eşzamanlı çoklu damlacık çarpmasını sayısal olarak inceledi. Ayrıca, bir sıvı film üzerine çoklu damlacık çarpması için tek fazlı (Liang *vd.*, 2019a) ve iki fazlı (Liang *vd.*, 2019b) ısı transfer davranışını göz önünde bulundurarak incelemişlerdir. Bir sıvı film üzerine çoklu damlacık çarpması ile çarpma bölgesindeki ısı transfer katsayısının, filmin etkilenmeyen bölgesinden çok daha büyük olduğunu belirtmişlerdir.

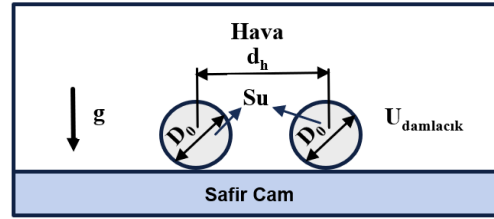
Literatürde bulunan çalışmaların çoğu tek damlacık etkileşimlerine odaklanırken, birden çok damlacığın etkileşimiyle ilgili oldukça sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Katı yüzeye tek bir damlacık çarptıktan sonra damlacık yayılmaya başlar ve dairesel yapıda ince bir sıvı film oluşur. Bununla birlikte, katı bir yüzeye birden çok sayıda damlacık çarpması sonucu, çarpma koşulları ve damlacıkların arasındaki mesafeye bağlı olarak bir etkileşim meydana gelmektedir. Bu etkileşim nedeniyle damlacık başına daha az yayılma gerçekleşir. Dolayısıyla ortaya çıkan hidrodinamik ve ısı transferi değişimleri tek damlacık etkileşimlerinden oldukça farklıdır. Sprey soğutma olgusunda gerçekleşen fiziksel mekanizmalar ve modelleme ile ilgili zorluklar, damlacıkların rastlantısallığından ve izlenemez davranışlarından kaynaklanmaktadır. Bu sebeple, karmaşık yapı basitleştirilerek az ve bilinen sayıda damlacıkların etkileşimlerinin incelenmesi gereklidir. Bu makalenin amacı, damlacık çarpma koşullarının yanı sıra çoklu damlacıklar için damlacık sayısı ve damlacıklar arası yatay mesafenin ısı transferi davranışı üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Bu nedenle VOF metodu kullanılarak 3 boyutlu sayısal bir model geliştirilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Doğrulanmış sayısal modelle farklı konfigürasyonlara sahip çoklu damlacık etkileşimleri parametrik olarak incelenmiştir. Tek damlacık çarpması referans alınarak çoklu damlacık etkileşimlerinde soğutma verimliliği ve yüzeyden gerçekleşen ısı transferi performans kaybının değişimi damlacık sayısı ve aralarındaki yatay mesafe için belirlenerek literature katkı sağlanmıştır.

SAYISAL MODEL

Katı bir yüzey üzerine çoklu damlacık çarpmaları durumunda, damlacıklar arası etkileşim olgusu, damlacık çarpma koşullarına bağlı olarak meydana gelir. Bu etkileşim nedeniyle, damlacık hidrodinamiği ve ısı transferi davranışları, tek damlacık çarpmasından oldukça farklıdır. Bu nedenle, bu problemi doğası gereği 2 boyutlu sayısal modeller ile incelemek yeterli değildir. Katı yüzey üzerine düşen çoklu damlacıklar, bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) programı olan Star-CCM + programı kullanılarak modellenmiştir. Bu yazılımı kullanarak çok fazlı akışları da içeren çeşitli mühendislik problemleri modellenebilir ve simüle edilebilir.

Ağ yapısı analizi için farklı ağ durumuyla 16 mm × 16 mm × 5 mm'lik hesaplama alanı kullanılmıştır. Farklı sayıda (1,875 × 10⁶, 7,5 × 10⁶ ve 10 × 10⁶) ağ sayılarına

sahip modeller sonuçların ağdan bağımsız olduğundan emin olmak için incelenmiştir (Gultekin, 2021). Yüzey sınırına yakın bölgelerde ağ yapısı daha yoğun uygulanırken, yüzeyden uzaklaştıkça daha seyrek bir ağ yapısı kullanılmıştır. Başka bir deyişle, yüzeyden uzaklaştıkça modelin arayüz yakalamada hata miktarı artmaktadır. Damlacıkların yüzeyde kapladığı alan ve damlacık etkileşimi sırasında oluşan arayüzü yakalamak için yeterli ağ çözünürlüğüne sahip (7,5 × 10⁶) grid seçilmiştir. Kullanılan modelde boyutu 20 µm ile 40 µm arasında değişen dörtgen hücre ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama alanının genel bir şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Hesaplama alanı genel bir şematik gösterimi.

Damlacıkların ve havanın bulunduğu araştırma alanında VOF methodu kullanılarak arayüz takibi gerçekleştirilmiştir. Akışkanlar arasında keskin bir arayüz sağlamak amacıyla “Yüksek Çözünürlüklü Arayüz Yakalama (HRIC)” seçeneğini aktif hale getirmek için VOF metodunda konveksiyon 2. dereceye ayarlanmıştır. Tüm damlacıkların başlangıçta küresel olduğu ve safir yüzeyin üzerine yerleştirildiği varsayılmıştır, burada damlacıkların bulunduğu hacim sıvı olarak belirtilmiştir ve çarpma hızı başlangıç hızı verilerek simülasyonlar başlatılmıştır. Safir katı yüzey kaymaz duvar koşulu olarak modellenmiştir. Modellerde kullanılan alanların fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sayısal çalışmada kullanılan alanların fiziksel özellikleri.

	Özellikler	Birim	Değer
Su	Yoğunluk	[kg/m ³]	998
	Dinamik viskozite	[Ns/m ²]	0,001
	Yüzey gerilimi	[N/m]	0,072
	Özgül ısı kapasitesi,	[kJ/(kg K)]	4,18
Safir cam	Yoğunluk	[kg/m ³]	3980
	Özgül ısı kapasitesi	[kJ/(kg K)]	1134
	Termal iletkenlik	[W/(m K)]	32,5
	Termal yayılım	[m ² s]	2,79 × 10 ⁻⁵

STAR-CCM+'da arayüz takibi için Hirt ve Nichols (1981) tarafından önerilen damlacık-yüzey etkileşiminin simülasyonu için uygun olan VOF yaklaşımı kullanılmıştır. VOF yöntemi, havacılık, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde bulunan karmaşık geometriler ve hareketli arayüz sınırları içeren problemleri simüle etmek için oldukça etkili bir yöntemdir. Ayrıca, kaynama veya yoğuşma gibi faz değişikliği içeren akışları simüle etmek için yaygın olarak kullanılır. VOF yönteminde, akış alanı

hücrelere bölünür ve her hücrenin içindeki sıvı iki veya daha fazla fazdan oluşan bir karışım olarak ele alınır. Her zaman adımında, her hücredeki her fazın hacim oranı hesaplanır. Hacim oranı α , VOF yönteminde Eş. (1) şeklinde tanımlanır:

$$\alpha = \frac{\text{Sıvı fazın hacmi}}{\text{Kontrol hacminin toplam hacmi}} \quad (1)$$

burada α sıvı fazda 1, gaz fazında 0 ve arayüzde 0 ile 1 arasında değerlerdir. VOF yönteminin diğer sayısal yöntemlerden farkı, sıvı özelliklerinin hücrenin α değerine göre güncellendiği iki faz (gaz-sıvı) için sadece bir momentum denkleminin çözülmesidir. Gaz-sıvı için süreklilik ve momentum denklemleri Eş.(2) ve Eş. (3) ile verilmiştir.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \quad (2) \\ \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) &= -\nabla p + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}_\sigma + \rho \mathbf{g} \quad (3) \end{aligned}$$

burada \mathbf{f}_σ ve \mathbf{g} , sürekli yüzey kuvveti modeli (Brackbill *vd.*, 1992) tarafından hesaplanan arayüzde sıvıya etki eden yüzey gerilimi ve yerçekimi kuvvetleri içindir. Bu modelde sıvı ve gazların tamamen karışmadığı varsayılmaktadır. Arayüzde sıvıya etki eden yüzey gerilimi Eş. (4) ile verilmiştir.

$$\mathbf{f}_\sigma = \sigma \kappa \mathbf{n}, \quad \kappa = -\nabla \cdot \left[\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right], \quad \mathbf{n} = \nabla \alpha \quad (4)$$

burada κ , arayüzün ortalama eğriliğidir ve \mathbf{n} , arayüze normal ve sıvıdan gaza yönlendirilmiş birim vektördür. Eş. (3)'de, bulunan sıvı yoğunluğu ρ ve viskozite μ Eş. (5) ve Eş. (6) ile tanımlanır:

$$\rho = \alpha \rho_{sıvı} + (1 - \alpha) \rho_{gaz} \quad (5)$$

$$\mu = \alpha \mu_{sıvı} + (1 - \alpha) \mu_{gaz} \quad (6)$$

Safir yüzey içindeki enerji korunumu denklemi Eş. (7) ile ifade edilir:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T) \quad (7)$$

burada ρ_s , c_s ve k_s sırasıyla safir yüzeyin yoğunluğunu, ısı kapasitesini ve termal iletkenliğini gösterir. Sayısal çalışmalarda adaptif zaman adımı kullanılmıştır. Adaptif zaman adımı Courant – Friedrichs – Lewy (CFL) kriterlerine göre belirlendi. Bu kriterde Courant sayısı Eş. (8) ile tanımlanır:

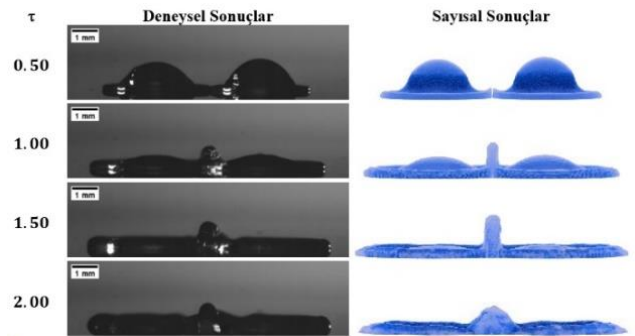
$$\text{Courant sayısı} = U \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (8)$$

burada U hızın büyüklüğü, Δt zaman aralığı ve Δx ağ elemanları arasındaki mesafedir. Courant sayısı 1'den küçük veya 1'e eşit olmalıdır, aksi takdirde sonuçlar yakınsamayacağından problem doğru bir şekilde çözülmeyecektir. Sonuçların yakınsaması için zaman

aralığı azaltılabilir veya daha kötü bir ağ yapısı seçilebilir. Sayısal çalışmalarımızda Courant sayısı 0,5 alınarak adaptif zaman adımı uygulandı. Ayrıca, gevşeme faktörü 0,9 ve maksimum iç iterasyonu 5 olarak uygulandı.

Sayısal Modelin Doğrulanması

Çoklu damlacık etkileşimleri için 3 boyutlu sayısal modeller geliştirilip deneysel verilerle (Gultekin, 2021) doğrulanmıştır. Şekil 2'de, ortam sıcaklığında katı bir yüzey ile damlacık çiftinin etkileşiminin deneysel ve sayısal sonuçlarını görsel olarak karşılaştırmaktadır. Şekillerden görülebileceği gibi, farklı boyutsuz zaman aralıkları için öngörülen damlacık çifti görselleri ile shadowgraph görüntüleri arasında büyük bir uyum olmasına rağmen, tam olarak örtüşme gerçekleşmemiştir. Sayısal model tahmini hesaplamasında bazı sınırlamalar vardır: Bir modelin karmaşıklığına bakılmaksızın bazı basitleştirmeler kaçınılmazdır; mükemmel bir model elde edilemez. Oluşturduğumuz modelde damlacıkların yüzeye çarpmadan önceki durumu tam küre olarak kabul edilmiştir. Ancak, görüntülerde elde edilen damlacıkların dairesellik oranı 0,90 civarındadır. Spesifik bir problem için mükemmel bir model kabul edilebilse bile, başlangıç ve sınır koşulları ve model parametreleri sonsuz hassasiyetle bilinmedikçe, tahmin sonuçları yine de hatalar içerir.



Şekil 2. Ortam sıcaklığında katı bir yüzey ile damlacık çiftinin şekilsel değişiminin deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılması. (Gultekin, 2021).

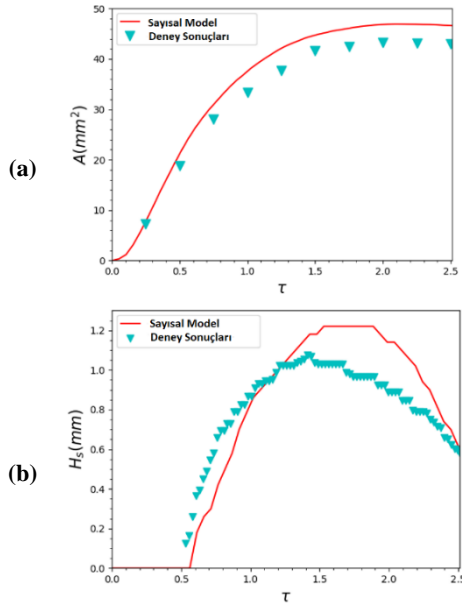
Modellemede kullanılan verilerin doğruluğu, görüntü analizi yöntemlerindeki hatalar, görüntü çözünürlüğündeki belirsizlikler ve damlacıkların yüzeye çarpmadan önceki dairesellik oranındaki değişim gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Özellikle, damlacıkların çapları, hızları ve aralarındaki mesafeler gibi verilerin doğruluğu, deneylerde elde edilen görüntülerden görüntü analizi yöntemleri kullanılarak elde edilmiş olmasına rağmen, görüntü çözünürlüğündeki belirsizlikler ve rastgelelik gibi faktörler nedeniyle bazı sapmalar oluşabilir. Bu faktörlerin ve bileşik etkilerinin tam örtüşme olmamasının muhtemel nedenleri olduğu değerlendirilebilir. Damlacık çiftinin dinamik çarpma koşulları Tablo 2'de verilmiştir. ImageJ programı (Schneider *vd.*, 2012) kullanılarak deneysel sonuçlardan damlacık çapları, çarpma hızları, dikey ve yatay mesafeler elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler sayısal

modele uygulanmıştır. Bu parametreler, başlangıçtaki ortalama damlacık çapı kullanılarak $\bar{d}_h = \frac{d_h}{D_0}$, $\bar{d}_v = \frac{d_v}{D_0}$ boyutsuzlandırılmıştır. Boyutsuz zaman τ ($\tau = tu_0/D_0$) olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, boyutsuz Weber sayısı, damlacık kinetik enerjisinin yüzey gerilimine oranını temsil eder ve $We = \rho u_0^2 D_0 / \sigma$ şeklinde tanımlanır.

Tablo 2. Ortam sıcaklığında damlacık çiftinin çarpma koşulları.

Parametreler	Damlacık çifti	
Damlacık çapları [mm]	2,23	2,25
Damlacık hızları [m/s]	1,13	1,13
We	40	40
\bar{d}_h	1,80	
\bar{d}_v	0,02	

Modelimizi nicel verilerle doğrulamak için, ilk olarak, Şekil 3 (a)'da gösterildiği gibi, damlacık çifti için yayılma alanının boyutsuz zamanla değişimi karşılaştırılarak oldukça iyi bir uyum olduğu görüldü. Daha sonra Şekil 3 (b)'de gösterildiği gibi katman yüksekliğinin boyutsuz zamanla değişimi de karşılaştırılmıştır. Sayısal olarak tahmin edilen katman yüksekliğinin değişimi ile deneysel sonuçlar arasında büyük benzerlikler olmasına rağmen, sayısal model katman yüksekliğini biraz fazla tahmin etmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi sayısal veriler ile deneysel veriler arasında oldukça iyi bir uyum bulunmaktadır.



Şekil 3. (a) Yayılma alanının boyutsuz zamanla değişimi ve (b) katman yüksekliğinin boyutsuz zamanla değişiminin deneysel ve sayısal karşılaştırılması. (İşaretler deneysel sonuçları temsil ederken düz çizgiler sayısal sonuçları temsil etmektedir.) (Gultekin, 2021).

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Sıcak yüzeyden gerçekleşecek olan ısı transferi damlacıkların yüzeyde yayılması ile doğrudan bağlantılıdır. Damlacıkların yüzeyde yayılması ise damlacık çapı, damlacık hızı, damlacıklar arası mesafe ve sıvının fiziksel özellikleri gibi faktörlere bağlıdır. Weber sayısı arttıkça damlacıkların yüzeyde yayılma

alanı artmaktadır. Bu yüzden, sadece damlacık çaplarının etkisini görmek için aynı Weber sayısında farklı damlacık çapları için (Gultekin, 2021) numaralı çalışmamızda karşılaştırıldı. Weber sayısını aynı tutmak için damlacıkların başlangıç hızları farklı alındı. Yayılma faktörünün başlangıçta tüm durumlar için hemen hemen aynı davranışı gösterdiği gözlemlendi. Belli bir noktadan sonra daha küçük damlacık çapları için yayılma faktörünün daha yüksek olduğu gözlemlendi. Başka bir deyişle, daha yüksek çarpma hızına sahip damlacıkların, aynı Weber sayıları için daha geniş yayılma alanına neden olduğu görüldü. Bu makale kapsamında damlacık çapları ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Eşzamanlı çoklu damlacıklarda çarpma hızı, damlacıklar arası yatay mesafe ve damlacık sayısı incelenmiştir.

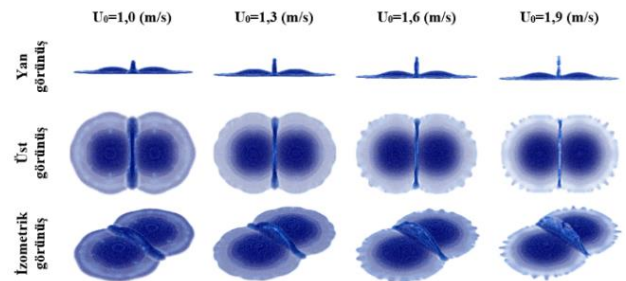
Eşzamanlı Damlacık Çifti için Çarpma Hızının Etkisi

Katı yüzeye eşzamanlı damlacık çifti çarpmalarında damlacık çarpma hızının etkisini görmek için, farklı ilk çarpma hızları karşılaştırıldı. Parametrik incelemeler için damlacık çifti çarpma koşulları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Eşzamanlı damlacık çiftlerinde çarpma hızının etkisini araştırmak için kullanılan damlacık parametreleri.

Parametreler	Değer
Damlacık çapı [mm]	2,30
Damlacık hızı [m/s]	1,0-1,3-1,6-1,9
Weber sayısı	32 – 115
Yüzey sıcaklığı	130
\bar{d}_h	1,6

Farklı çarpma hızları için katı yüzeye damlacık çifti etkileşimleri $\tau=1$ zamanında Şekil 4'te verilmiştir. En düşük çarpma hızı durumunda, orta bölgedeki etkileşim, damlacıkların başlangıçta sahip olduğu düşük kinetik enerjisi yüzünden minimum katmanyüksekliğine yol açar. Weber sayısı arttıkça, damlacığın hidrodinamik davranışı da benzer bir davranış gösterir, ancak daha büyük başlangıç kinetik enerjisi nedeniyle katmanyüksekliğinin şiddeti artar. Bir noktadan sonra, Weber sayısı arttıkça katman yüksekliği kararlılığını kaybeder ve ayrılmalar gerçekleşir.

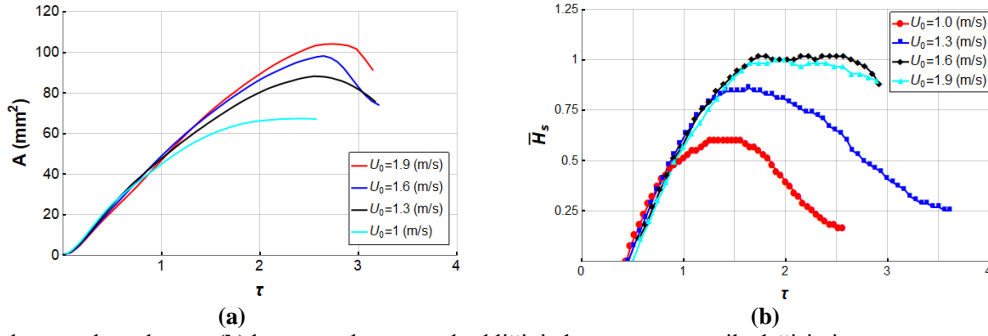


Şekil 4. Farklı çarpma hızları için $\tau=1$ anında eşzamanlı damlacık çifti etkileşimleri.

Şekil 5 (a) ve (b), farklı çarpma hızlarına sahip damlacık çiftleri için toplam yayılma alanı ve boyutsuz katman yüksekliğinin zamanla değişimini göstermektedir. Efektif toplam yayılma alanı değerleri, tüm durumlar için büyük ölçüde $\tau=1$ 'e kadar benzerdir. Bu değerlerde olan benzerlik, $\tau=2$ anında $U_0=1,6$ (m/s) ve $U_0=1,9$ (m/s)

devam ederken, düşük çarpma hızlarına sahip durumlarda yayılma süreci bittiği ve gerileme süreci başladığı için farklı bir eğilim göstermektedir. Şekil 5 (b), boyutsuz katman yüksekliğinin zamanla değişimini göstermektedir. Şekilden görülebileceği gibi, düşük çarpma hızı durumlarında, boyutsuz yükselen levha, yerçekimi etkisi nedeniyle maksimum yüksekliğe

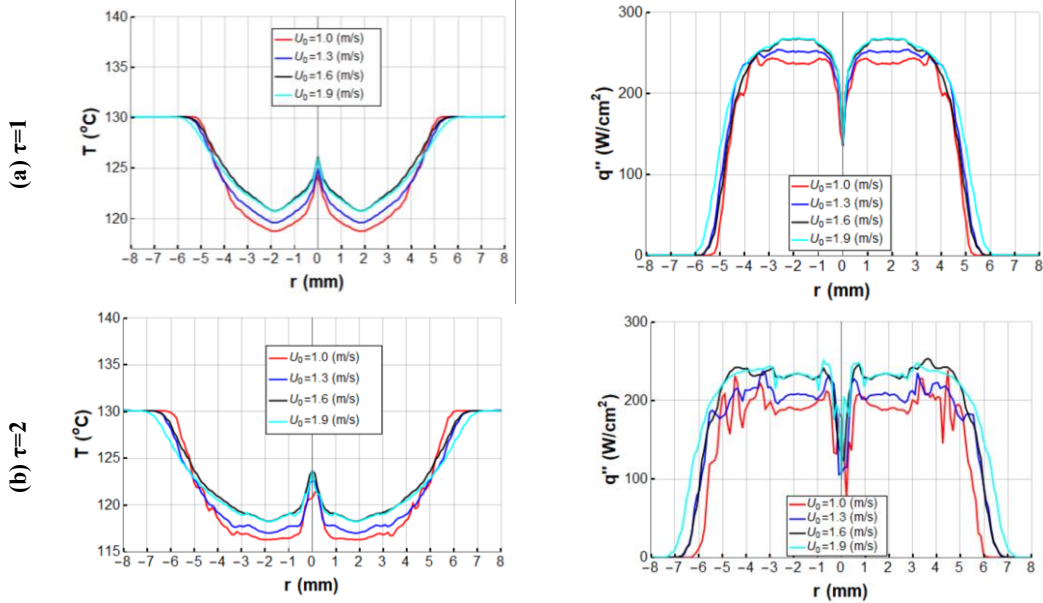
ulaştıktan sonra tekrardan düşmeye başlar. Yüksek çarpma hızı durumlarında, bir noktada oluşan yükselti kararlılığını kaybederek parçalanmaya başlar. Katman yükselmesinde parçalanma gerçekleştikten sonra kopan parçaların yükselmesi dikkate alınmamıştır. Bütünlüğü sağlayan kısımdaki yükseklik dikkate alınmıştır.



Şekil 5. (a) Toplam yayılma alanı ve (b) boyutsuz katman yüksekliğinin boyutsuz zaman ile değişimi.

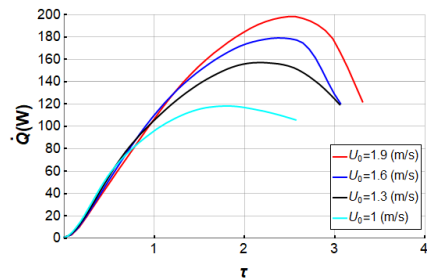
Damlacık çarpma hızının etkisini daha iyi görmek için, sıcaklık dağılımları ve ısı akısı değişimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Etkileşimin ilk aşamasında etki alanı çok küçük olmasına rağmen, ısıtılan yüzey ile damlacıklar arasındaki büyük sıcaklık farkları nedeniyle yüzey sıcaklığı hızla düştüğü ve birim alan başına oluşan ısı transferinin daha yüksek olduğu görülmüştür. En düşük

çarpma hızı durumunda yüzey sıcaklığında daha belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, çarpma hızı azaldıkça boyutsuz zamanın aynı değere ulaşmasının daha fazla zaman almasıdır. Yüksek çarpma hızındaki damlacık çiftlerin yüzey üzerindeki termal etkileri büyük ölçüde benzerdir.



Şekil 6. Farklı çarpma hızları için damlacık çiftleri için yüzey sıcaklık dağılımları ve ısı akısı değişimleri (a) $\tau=1$ ve (b) $\tau=2$.

Şekil 7, farklı çarpma hızlarına sahip eşzamanlı damlacık çiftlerinin yüzeyde yayılmasıyla gerçekleşen ısı transferinin boyutsuz zamanla değişimini göstermektedir. Isı transferinin boyutsuz zamanla değişimi, yayılma alanının zamanla değişimi ile benzer davranışlar göstermiştir. Beklendiği gibi çarpma hızı arttıkça yüzeydeki yayılma alanı arttığı için yüzeyden oluşan ısı transferi de artmaktadır.



Şekil 7. Farklı çarpma hızlarına sahip damlacık çiftlerinin yüzeyde yayılmasıyla gerçekleşen ısı transferinin boyutsuz zamanla değişimi.

Eşzamanlı Damlacık Çifti için Damlacıklar Arası Yatay Mesafenin Etkisi

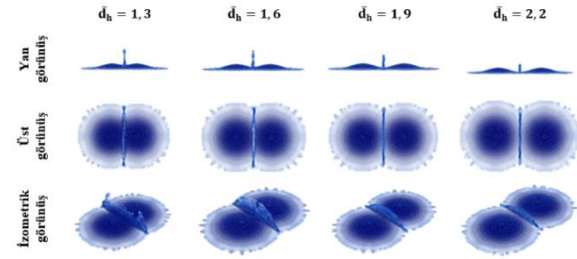
Damlacıklar arası yatay mesafe, damlacıklar arası oluşan etkileşimin şiddetini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Damlacık çifti etkileşimlerinde damlacıklar arası yatay mesafenin etkisini görmek için farklı yatay mesafeler karşılaştırılmıştır. Parametrik incelemeler için damlacık çifti çarpma koşulları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Eşzamanlı damlacık çiftlerinde damlacıklar arası yatay mesafenin etkisini araştırmak için kullanılan damlacık parametreleri.

Parametreler	Değerler
Damlacık çapı [mm]	2,30
Damlacık hızı [m/s]	1,9
Weber sayısı	115
Yüzey sıcaklığı	130
$\bar{d}_h=1$	1,3 - 1,6 - 1,9 - 2,2

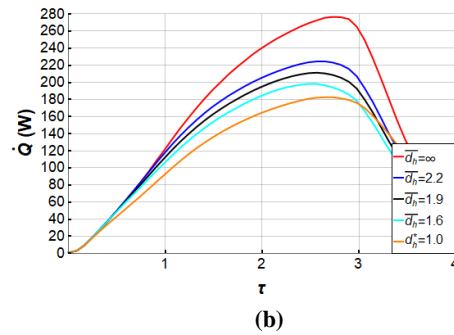
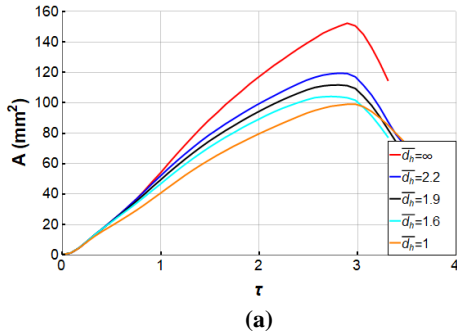
Farklı yatay mesafeler için $\tau=1$ anında damlacık çifti etkileşimleri Şekil 8'de verilmiştir. Beklendiği gibi, aralarındaki yatay mesafe ne kadar küçük olursa, damlacıklar yüzeydeki yayılma sürecinde birbirleriyle o kadar hızlı etkileşime girdiği görülmüştür. Daha büyük yatay mesafeler için, lameller viskoz yayılım nedeniyle

daha fazla enerji kaybederek daha zayıf katman yüksekliğine neden olmuştur.



Şekil 8. Damlacıklar arası farklı yatay mesafeler için $\tau=1$ anında eşzamanlı damlacık çifti etkileşimleri.

Şekil 9, farklı yatay mesafelere sahip damlacık çiftleri için yüzeyde gerçekleşen toplam yayılma alanı ve yüzeyden gerçekleşen ısı transferinin boyutsuz zamanla değişimini göstermektedir. Damlacıklar arasındaki yatay mesafe azaldıkça etkileşimin büyüklüğü artmakta ve yüzeyde kaplanan yayılma alanı ve ısı transferi azalmaktadır. Efektif toplam yayılma alanları, $\tau=2$ 'de $\bar{d}_h=2.2$ ve $\bar{d}_h=1$ konfigürasyonları için sırasıyla tek damlacık konfigürasyonundan %14,5 ve %32 daha azdır. Bu değerler $\tau=3$ 'te sırasıyla %22 ve %34'tür. Isı transferinin değişimi için benzer davranışlar gözlenir ve performans kaybı değerleri hemen hemen aynıdır. Bu nedenle damlacıklar arası etkileşim olgusunun özellikle damlacık çarpmasından sonraki ilk aşamalarda soğutma verimini güçlü bir şekilde etkilediği söylenebilir.

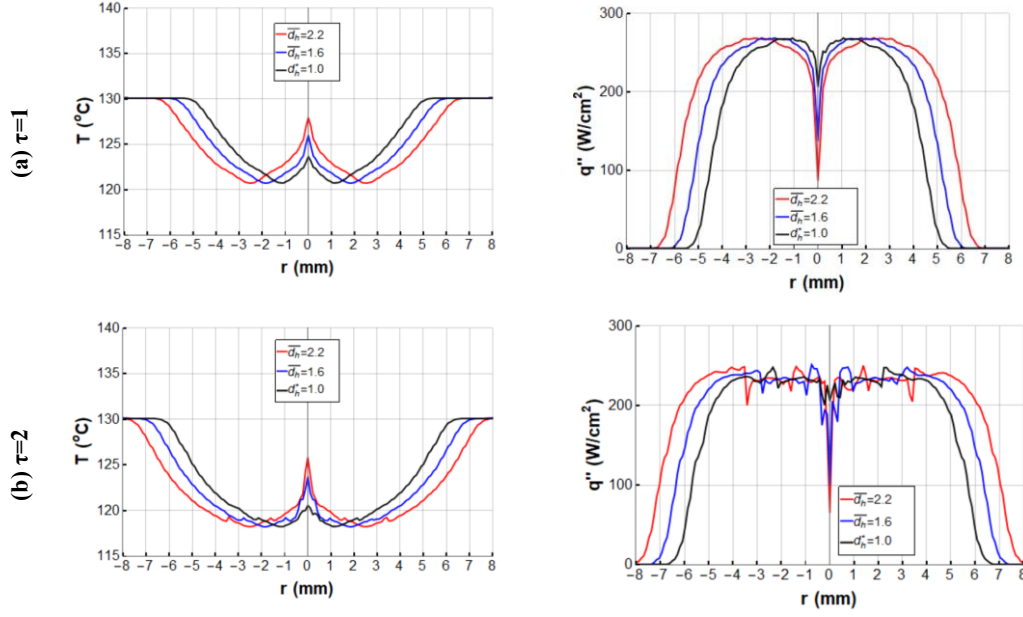


Şekil 9. Farklı yatay mesafelere sahip damlacık çiftleri için yüzeyde gerçekleşen (a) toplam yayılma alanı ve (b) ısı transferinin boyutsuz zamanla değişimi.

Eşzamanlı damlacık çiftleri için yatay mesafenin sıcaklık dağılımları ve ısı akısı davranışı üzerindeki etkisi Şekil 10'da gösterilmektedir. Damlacıklar arasındaki yatay mesafe arttıkça etkileşim daha fazla geciktiğinden dolayı damlacıklar katı yüzey üzerinde daha fazla yayılmıştır ve ısıtılan yüzeyden daha fazla ısı akısı oluştuğu görülmüştür.

İncelenen koşullarda safir camdan gerçekleşen ısı akısı 250 W/cm^2 mertebelerinde olduğu görülmüştür. Bunun yanında, elektronik cihazlardaki sprej soğutma uygulamalarındaki ısı akısı, uygulamanın özel koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Bu

koşullar elektronik cihazın boyutu ve tipi, soğutucu sprejin özellikleri ve sprejin akış hızı ve basıncı gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Bunun yanında ısı akısı, yüzeyin sıcaklığı ve soğutucu akışkanın sıcaklık farkına ve yüzeyde kullanılan malzemenin ısı iletkenliğine bağlı olduğundan uygulama sırasında büyük ölçüde değişebilir. Daha yüksek sıcaklığa ve ısı iletkenliğe sahip metal yüzeylerden çok daha fazla oranda ısı akısı gerçekleşecektir. Ayrıca, farklı yüzey morfolojileri kullanılarak sprej soğutma uygulamalarındaki gerçekleşen ısı akıları, 1000 W/cm^2 mertebelerine ulaşabilmektedir.



Şekil 10. Farklı yatay mesafelere sahip damlacık çiftleri için yüzey sıcaklık dağılımları ve ısı akısı değişimleri (a) $\tau=1$ ve (b) $\tau=2$.

Eşzamanlı Çoklu Damlacık Etkileşimleri için Damlacık Sayısının Etkisi

Sprey soğutma için damlacıklar arası hiçbir etkileşimin olmadığı en optimum durumu varsaydığımızda, her bir damlacık tek bir damlacık gibi yayılır, o zaman toplam yayılma alanı, tek bir damlacık için oluşan yayılma alanının damlacık sayısı (N) çarpımıyla elde edilir. Ancak, çoklu damlacıklar katı bir yüzeye çarptığında, damlacık parametrelerine (damlacık hızı, damlacıklar arası mesafe, damlacık sayısı vb.) bağlı olarak damlacıklar birbirine yeterince yakınsa damlacıklar arasında bir etkileşim gerçekleşir. Damlacıkların hidrodinamik ve ısı transferi davranışları, bu etkileşim nedeniyle tek damlacık durumlarından oldukça farklıdır. Bu etkileşim, katı yüzey üzerinde damlacık başına daha küçük yayılma alanına neden olur. Bu nedenle, katı yüzeye aynı anda çarpan çoklu damlacıklar için yayılma alanını tahmin etmek için Gultekin (2021) doktora tezinde Eş. (9) ve Eş. (10) ifadelerini önermiştir.

$$A_{ND} = NA_{SD} - (N - 1)A_i \quad (9)$$

burada N damlacık sayısıdır, A_{SD} tek damlacık için yayılma alanıdır ve A_i etkileşim nedeniyle oluşan alan kaybıdır. Bu denklemi boyutsuz hale getirerek ve düzenleyerek aşağıdaki şekilde tekrar yazabiliriz.

$$\bar{A}(\tau) = \frac{A_{toplamlam}(\tau)}{ND_0^2} = \pi \frac{\beta^2(\tau)}{4} \left[1 - \frac{2 * (N - 1)}{\pi N} \left(\cos^{-1} \left(\frac{\bar{d}_h}{\beta(\tau)} \right) - \sqrt{\left(\frac{\bar{d}_h}{\beta(\tau)} \right)^2 - \left(\frac{\bar{d}_h}{\beta(\tau)} \right)^4} \right) \right] \quad (10)$$

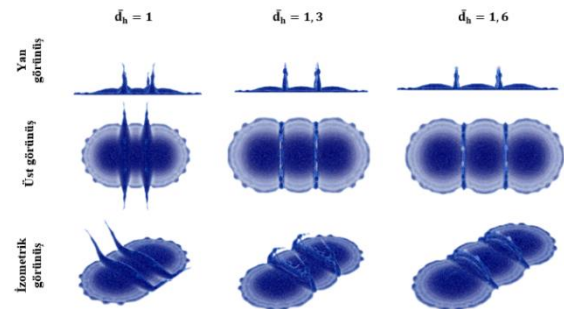
Denklemden görülebileceği gibi, etkin yayılma alanı, damlacık çarpma koşullarına ve damlacık sayısına ve

damlacıklar arasındaki yatay mesafeye bağlıdır. Bu nedenle, eşzamanlı üçlü damlacık durumları için farklı yatay mesafeler incelenmiştir. Parametrik incelemeler için üçlü damlacık konfigürasyonları çarpma koşulları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Eşzamanlı üçlü damlacık konfigürasyonlarında damlacıklar arası yatay mesafenin etkisini araştırmak için kullanılan damlacık parametreleri.

Parametreler	Değerler
Damlacık çapı [mm]	2,30
Damlacık hızı [m/s]	1,9
Weber sayısı	115
Yüzey sıcaklığı	130
\bar{d}_h	1- 1,3- 1,6

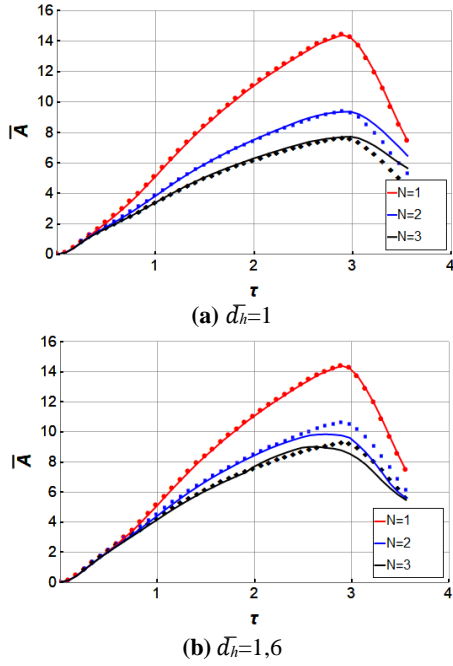
Farklı yatay mesafeler için katı yüzeye üçlü damlacık çarpması Şekil 11'de verilmiştir. Genel olarak damlacık çifti ile benzer hidrodinamik davranışlar gözlenmiştir.



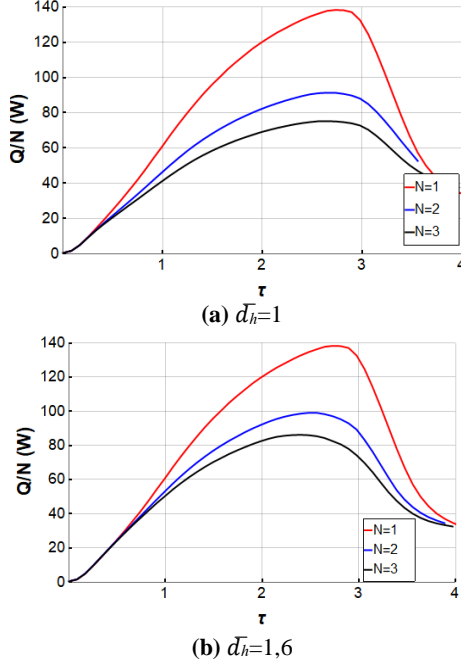
Şekil 11. Damlacıklar arası farklı yatay mesafeler için $\tau=1$ anında eşzamanlı üçlü damlacık konfigürasyonu etkileşimleri.

Şekil 12, farklı sayıda damlacık konfigürasyonları için boyutsuz yayılma alanının boyutsuz zamanla değişimi için sayısal sonuçların ve önerilen ifadenin karşılaştırmasını göstermektedir. Önerilen analitik model genellikle $\tau \approx 2,5$ 'e kadar hesaplama sonuçlarıyla

uyumludur. Ayrıca, farklı sayıda damlacık çarpması için damlacık başına yüzeyden oluşan ısı transferinin değişimi Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 12. Farklı damlacık sayıları için boyutsuz yayılma alanının boyutsuz zamanla değişimi. Düz çizgiler hesaplama sonuçlarını temsil ederken semboller denklem (10)'u temsil etmektedir. (a) $\bar{d}_h=1$ (b) $\bar{d}_h=1,6$.



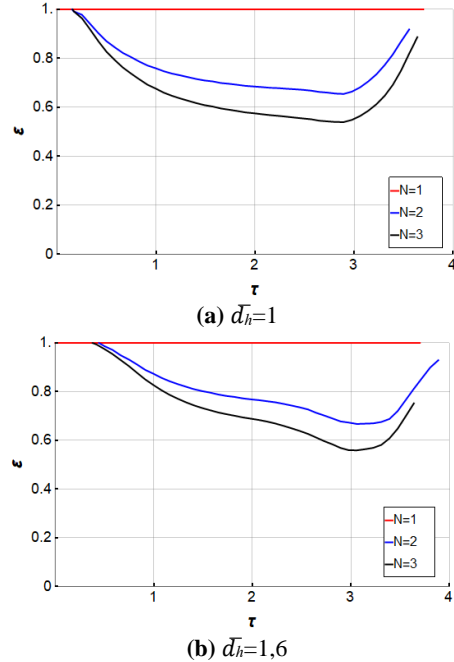
Şekil 13. Farklı sayıda damlacık çarpması için damlacık başına yüzeyden gerçekleşen ısı transferinin zamanla değişimi (a) $\bar{d}_h=1$ (b) $\bar{d}_h=1,6$.

Tek damlacık etkisini referans alarak çoklu damlacık sayısının soğutma verimliliği üzerindeki etkisini incelemek istersek. Çoklu damlacıklar için soğutma verimi performansını, N tane damlacıkların çarpışmasından kaynaklanan toplam ısı transferinin, N

sayıda tek bir damlacığın çarpışmasından oluşan toplam ısı transferine oranlayarak Eş.(11) ifadesiyle tanımlanabilir.

$$\epsilon = \frac{Q_{ND}}{N * Q_{SD}} \quad (11)$$

Etkileşimin olmadığı spray soğutma için en uygun koşul varsayıldığında, her bir damlacık tek bir damlacık gibi yayılır ve ϵ bire gider. Etkileşimlerin tamamen baskın hale geldiği tersi durumda ise $1/N$ 'ye yakınsar. Şekil 14 (a) ve (b), farklı damlacık sayısına sahip konfigürasyonlar için sırasıyla $\bar{d}_h = 1$ ve $\bar{d}_h = 1,6$ durumlarında soğutma verimliliği performansının boyutsuz zamanla değişimini göstermektedir. Önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi, damlacıklar arasındaki yatay mesafe ne kadar kısaysa, etkileşim daha erken gerçekleşir. Soğutma verimliliği performansı büyük ölçüde damlacık sayısına ve çoklu damlacıklar arasındaki yatay mesafeye bağlıdır. Damlacık çifti ve üçlü damlacık konfigürasyonlarının $\bar{d}_h = 1$ ve $\tau=1$ durumunda soğutma verimlilikleri sırasıyla 0,76 ve 0,67'dir. Bu değerler $\tau=3$ anında sırasıyla 0,66 ve 0,54 değerleridir. Boyutsuz yatay mesafe 1,6 olduğunda, $\tau=1$ için damlacık çifti ve üçlü damlacık konfigürasyonları durumunda soğutma verimleri sırasıyla 0,87 ve 0,82'dir. Bu değerler $\tau=3$ anında sırasıyla 0,67 ve 0,56 değerleridir. Bu nedenle, özellikle damlacık çarpışmasından sonraki ilk aşamalarda, etkileşim olgusunun soğutma verimini güçlü bir şekilde etkilediği söylenebilir.

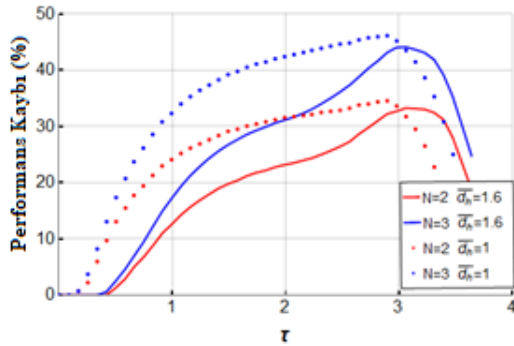


Şekil 14. Farklı damlacık sayısına sahip konfigürasyonlar için sırasıyla (a) $\bar{d}_h=1$ ve (b) $\bar{d}_h=1,6$ durumlarında soğutma verimliliği performansının boyutsuz zamanla değişimi.

Aynı şekilde performans kaybı (%) Eş. (12) ifadesiyle tanımlanabilir.

$$\text{Performans Kaybı (\%)} = \left(1 - \frac{\dot{Q}_{ND}}{N * \dot{Q}_{SD}}\right) * 100 \quad (12)$$

Şekil 15, farklı sayıda damlacık ve yatay mesafeler için performans kaybının değişimini göstermektedir. Şekilden görülebileceği gibi, çoklu damlacık etkileşimi olgusu, özellikle damlacık çarpmasından sonraki ilk aşamalarda soğutma performansını güçlü bir şekilde etkiler. Damlacık çifti ve üçlü damlacık konfigürasyonlarında $\bar{d}_h=1$ ve $\tau=1$ anında performans kayıpları sırasıyla %24 ve %33'tür. Bu değerler $\tau=3$ 'te sırasıyla %34 ve %46'dır. Boyutsuz yatay mesafe 1,6 olduğunda, $\tau=1$ için damlacık çifti ve üçlü damlacık konfigürasyon durumunda performans kayıpları sırasıyla %13 ve %18'dir. Bu değerler $\tau=3$ 'te sırasıyla %33 ve %44'tür.



Şekil 15. Farklı sayıda damlacık ve yatay mesafeler için performans kaybının zamanla değişimi. Düz çizgiler $\bar{d}_h=1.6$ için hesaplama sonuçlarını temsil ederken, noktalar $\bar{d}_h=1$ için hesaplama sonuçlarını temsil etmektedir.

SONUÇLAR

Sprey soğutma sırasında sıcak bir yüzeye etkileyen çoklu damlacıkların birbirleri ile etkileşimlerinin yüzeyden olan ısı transferi performansına etkisi sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Sayısal incelemelerde Star CCM+ yazılımı kullanılmış olup ara yüz takibi için VOF yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında, damlacık çarpma hızı, damlacıklar arasındaki yatay mesafe ve damlacık sayısı gibi parametreler incelenmiştir. Damlacıklar arasındaki yatay mesafe kısaltıldıkça etkileşimin büyüklüğü artar ve yüzeyde kaplanan yayılma alanı ve ısı transferi azalır. Efektif yayılma alanları, $\tau=2$ 'de sırasıyla $\bar{d}_h=2,2$ ve $\bar{d}_h=1$ konfigürasyonları için tek damlacık konfigürasyonundan % 14,5 ve % 32 daha azdır. Bu değerler $\tau=3$ 'te sırasıyla % 22 ve % 34'tür.

Tek bir damlacık için yayılma faktörünün değişimini hesaba katarak katı yüzey üzerinde eş zamanlı etki eden birden çok damlacık için damlacık başına yayılma alanını tahmin etmek için matematiksel bir ifade önerilmiştir. Damlacık sayısının soğutma performansına etkisini görmek için, tek bir damlacık için soğutma performansının değişimi referans alınarak bir ifade tanımlandı. Etkileşimin özellikle çoklu damlacık etkileşiminden sonraki ilk aşamalarda soğutma

performansını güçlü bir şekilde etkilediği bulunmuştur. Damlacık çifti ve üçlü damlacık konfigürasyonları ($\bar{d}_h=1$ ve $\tau=3$ durumunda) performans kayıpları sırasıyla %34 ve %46'ya varmaktadır. Boyutsuz yatay mesafe 1,6 olduğunda, soğutma performansları sırasıyla çift damlacık çifti ve üçlü konfigürasyonlarda %33 ve %44'tür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Japonya Atom Enerjisi Ajansı tarafından Nükleer Enerji Bilimi ve Teknolojisi ve İnsan Kaynakları Geliştirme Projesi kapsamında finansal olarak desteklenmiştir. Ayrıca, ilk yazara Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK/2214-A-Yurt Dışı Doktora Sırası Araştırma Burs Programı) tarafından mali destek sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Akao, F., Araki, K., Mori, S., Moriyama, A., 1980, Deformation Behaviors of a Liquid Droplet Impinging Onto Hot Metal Surface, *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 20, 737–743, doi.org/10.2355/isijinternational1966.20.737
- Bostanci, H., Rini, D.P., Kizito, J.P., Singh, V., Seal, S., Chow, L.C., 2012, High heat flux spray cooling with ammonia : Investigation of enhanced surfaces for CHF. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 3849–3856, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.040
- Brackbill, J.U., Kothe, D.B., Zemach, C., 1992, A continuum method for modeling surface tension, *Journal of Computational Physics*, 100, 335–354, doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y
- Breitenbach, J., Roisman, I. V., Tropea, C., 2017, Heat transfer in the film boiling regime : Single drop impact and spray coolin, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 34–42, doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.004
- Castrejón-Pita, J.R., Martin, G.D., Hoath, S.D., Hutchings, I.M., 2008, A simple large-scale droplet generator for studies of inkjet printing, *Review of Scientific Instruments*, 79, doi.org/10.1063/1.2957744
- Cheng, W., Zhang, W., Jiang, L., Yang, S., Hu, L., 2015, Experimental investigation of large area spray cooling with compact chamber in the non-boiling regime, *Applied Thermal Engineering*, 80, 160–167, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.055
- Clanet, C., Béguin, C., Richard, D., Quéré, D., 2004, Maximal deformation of an impacting drop, *Journal of Fluid Mechanics*, 517, 199–208, doi.org/10.1017/S0022112004000904

- Cossali, G.E., Marengo, M., Santini, M., Bergamo, U., 2005, Effects of wall effusivity on secondary droplet atomisation from single and multiple drop impact onto heated surfaces, *Proceedings of the 20th ILASS - Europe Meeting*, pp. 1–6, Orleans, France.
- Cossali, G., Marengo, M., Santini, M., 2003, Multiple drop impact on heated surface, *Proceedings of the 9th ICLASS*, Sorrento, Italy.
- de Gans, B.-J., Duineveld, P.C., Schubert, U.S., 2004, Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments, *Advanced Materials*, 16, 203–213, doi.org/10.1002/adma.200300385
- Ersoy, N.E., Eslamian, M., 2020, Central uprising sheet in simultaneous and near-simultaneous impact of two high kinetic energy droplets onto dry surface and thin liquid film, *Physics of Fluids*, 32, 012108, doi.org/10.1063/1.5135029
- Gultekin, A., 2021, *Experimental and numerical investigation of single and multiple droplet interactions with high-temperature surfaces*, Ph.D. Thesis, Istanbul Technical University, Istanbul, Türkiye.
- Gultekin, A., Erkan, N., Colak, U., Suzuki, S., 2020, PIV measurement inside single and double droplet interaction on a solid surface, *Experiments in Fluids*, 61, 1–18, doi.org/10.1007/s00348-020-03051-0
- Gultekin, A., Erkan, N., Ozdemir, E., Colak, U., Suzuki, S., 2021, Simultaneous multiple droplet impact and their interactions on a heated surface, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 120, 110255, doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2020.110255
- Hatakenaka, R., Breitenbach, J., Roisman, I. V., Tropea, C., Tagawa, Y., 2019, Magic carpet breakup of a drop impacting onto a heated surface in a depressurized environment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 145, 118729, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118729
- Hirt, C.W., Nichols, B.D., 1981, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39, 201–225, doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5
- Huang, H.M., Chen, X.P., 2018, Energetic analysis of drop's maximum spreading on solid surface with low impact speed, *Physics of Fluids*, 30, doi.org/10.1063/1.5006439
- Jung, J., Jeong, S., Kim, H., 2016, Investigation of single-droplet/wall collision heat transfer characteristics using infrared thermometry, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92, 774–783, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.050
- Lee, S.H., Harth, K., Rump, M., Kim, M., Lohse, D., Fezzaa, K., Je, J.H., 2020, Drop impact on hot plates: Contact times, lift-off and the lamella rupture, *Soft Matter*, 16, 7935–7949, doi.org/10.1039/d0sm00459f
- Liang, G., Mudawar, I., 2017, Review of drop impact on heated walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, 103–126, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.031
- Liang, G., Yu, H., Chen, L., 2019a, Interfacial phenomena in impact of droplet array on solid wall, *Acta Mechanica*, 231, 305–319, doi.org/doi.org/10.1007/s00707-019-02542-4
- Liang, G., Zhang, T., Chen, L., Chen, Y., Shen, S., 2019b, Single-phase heat transfer of multi-droplet impact on liquid film, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 288–292, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.145
- Liang, G., Zhang, T., Chen, Y., Chen, L., Shen, S., 2019c, Two-phase heat transfer of multi-droplet impact on liquid film, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, 832–847, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.055
- Liang, G., Zhang, T., Yu, H., Chen, H., Shen, S., 2018, Simultaneous Impact of Multiple Droplets on Liquid Film, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 65, 51–61, doi.org/doi.org/10.1016/j.jiec.2018.04.011
- Li, L., Jia, X., Liu, Y., Su, M., 2016, Simulation of double droplets impact on liquid film by a simplified lattice Boltzmann model, *Applied Thermal Engineering*, 98, 656–669, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.12.050
- Margarinos, I., Nikolopoulos, N., Marengo, M., Antonini, C., Gavaises, M., 2014, VOF simulations of the contact angle dynamics during the drop spreading: Standard models and a new wetting force model, *Advances in Colloid and Interface Science*, 212, 1–20, doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2014.07.004
- Mehdizadeh, N.Z., Chandra, S., 2006, Boiling during high-velocity impact of water droplets on a hot stainless steel surface, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 462, 3115–3131, doi.org/10.1098/rspa.2006.1722
- Nikolopoulos, N., Theodorakakos, A., Bergeles, G., 2007, A numerical investigation of the evaporation process of a liquid droplet impinging onto a hot substrate, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 303–319, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.012
- Panão, M.R.O., Moreira, A.L.N., 2005, Flow characteristics of spray impingement in PFI injection systems, *Experiments in Fluids*, 39, 364–374,

doi.org/10.1007/s00348-005-0996-2

Pasandideh-Fard, M., Aziz, S.D., Chandra, S., Mostaghimi, J., 2001, Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 22, 201–210, doi.org/10.1016/S0142-727X(00)00086-2

Pasandideh-Fard, M., Pershin, V., Chandra, S., Mostaghimi, J., 2002, Splat shapes in a thermal spray coating process: Simulations and experiments, *Journal of Thermal Spray Technology*, 11, 206–217, doi.org/10.1361/105996302770348862

Pournaderi, P., Pishavar, A.R., 2012, A numerical investigation of droplet impact on a heated wall in the film boiling regime, *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung*, 48, 1525–1538, doi.org/10.1007/s00231-012-0999-5

Reyhani, E., Hassan, M., Chini, S.F., 2017, Investigation of 2D drop evaporation on a smooth and homogeneous surface using Lattice Boltzmann method, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 89, 64–72, doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2017.09.019

Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W., 2012, NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis, *Nature Methods*, 9, 671–675, doi.org/10.1038/nmeth.2089

Shahmohammadi, M., Zhao, J., Yu, K.N., 2018, Investigation of droplet behaviors for spray cooling using level set method, *Annals of Nuclear Energy*, 113, 162–170, doi.org/10.1016/j.anucene.2017.09.046

Silk, E.A., Kim, J., Kiger, K., 2006, Spray cooling of enhanced surfaces: Impact of structured surface geometry and spray axis inclination, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 4910–4920, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.05.031

Soltani-Kordshuli, F., Eslamian, M., 2017, Impact dynamics and deposition of pristine and graphene-doped PEDOT:PSS polymeric droplets on stationary and vibrating substrates, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 89, 238–248, doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.08.019

Taghilou, M., Hassan, M., 2014, Lattice Boltzmann model for thermal behavior of a droplet on the solid surface, *International Journal of Thermal Sciences*, 86, 1–11, doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.06.006

Tran, T., Staat, H.J.J., Prosperetti, A., Sun, C., Lohse, D., 2012, Drop Impact on Superheated Surfaces, *Physical Review Letters*, 036101, 1–5, doi.org/10.1103/PhysRevLett.108.036101

Tran, T., Staat, H.J.J., Susarrey-arce, A., Foertsch, T.C., Van Houselt, A., Gardeniers, H.J.G.E., Prosperetti, A., Lohse, D., Sun, C., 2013, Droplet impact on superheated micro-structured surfaces, *Soft Matter*, 3272–3282, doi.org/10.1039/c3sm27643k

Ukiwe, C., Kwok, D.Y., 2005, On the Maximum Spreading Diameter of Impacting Droplets on Well-Prepared Solid Surfaces, *Langmuir*, 21, 666–673, doi.org/10.1021/la0481288

Villegas, L.R., Alis, R., Lepilliez, M., Tanguy, S., 2016, A Ghost Fluid / Level Set Method for boiling flows and liquid evaporation: Application to the Leidenfrost effect, *Journal of Computational Physics*, 316, 789–813, doi.org/10.1016/j.jcp.2016.04.031

Wang, Y., Wang, X., Wang, T., Yan, W., 2018, Asymmetric heat transfer characteristics of a double droplet impact on a moving liquid film, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 649–659, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.161

Wang, Z., Xing, Y., Liu, X., Zhao, L., Ji, Y., 2016, Computer modeling of droplets impact on heat transfer during spray cooling under vibration environment, *Applied Thermal Engineering*, 107, 453–462, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.176

Xiong, W., Cheng, P., 2018, 3D lattice Boltzmann simulation for a saturated liquid droplet at low Ohnesorge numbers impact and breakup on a solid surface surrounded by a saturated vapor, *Computers and Fluids*, 168, 130–143, doi.org/doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.03.082