



مدلسازی عددی جریان هوای فشرده در نازل دو سیال خشک‌کن پاششی

امید رضا روستاپور^۱، احمد افسری^۲، علی‌رضا تهور^۳، امین‌رضا سیاری^۴

۱-استادیار، بخش تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی- مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی فارس

۲-استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز- دانشکده مهندسی

۳-استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز- دانشکده مهندسی

دانشجوی کارشناسی ارشد- دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز- دانشکده مهندسی

چکیده

نازل دو سیال به منظور ایجاد قطرات ریز و یکنواخت در محدوده وسیعی از دبی در خشک‌کن پاششی به کار می‌رود. در این مطالعه جریان هوای فشرده در یک نازل فشاری دو سیال به روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. هوا به عنوان فاز پیوسته با فشار و جریان به ترتیب 56100 Pa و $4/5 \text{ m}^3/\text{h}$ از طریق دو منفذ تعبیه شده بر روی نازل وارد محفظه آن می‌شود. قطر این منافذ یک میلی‌متر بوده و به صورت خارج از محور بر روی نازل قرار گرفته‌اند و به این وسیله یک حرکت چرخشی برای جریان هوا در لحظه ورود به نازل ایجاد می‌کنند. برای شبیه‌سازی آشفتگی در نازل از مدل $k-\epsilon$ استفاده شد و معادلات توسط مدل لاگرانژی حل گردید. مدل الگوی جریان هوا نشانگر وجود چرخش با گردابه‌های بیضوی درون نازل می‌باشد و تمامی ذرات دارای یک مولفه چرخشی و یک مولفه محوری به سمت خروجی می‌باشند. این نوع جریان باعث شده که ذرات یک مسیر کاملاً پیچشی را به سمت خروجی نازل طی کنند. جریان هوای فشرده در داخل نازل شامل یک هسته مرکزی کم سرعت بوده که جریان‌های گردابه‌ای پر سرعت در اطراف آن در جریان هستند. در نهایت ذرات به صورت یک مخروط تو خالی و دارای جریان چرخشی به طور کاملاً یکنواخت از نازل خارج می‌گردند. فشار هوا در نازل در ناحیه مرکزی کاهش می‌یابد. همچنین در دهانه خروجی به علت تنگ شدن مسیر، افت فشار ایجاد خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: نازل دو سیال، مدل‌سازی عددی دینامیک سیال، الگوی جریان، الگوی فشار

در خشک‌کن پاششی با تبدیل مایع به قطرات ریز توسط نازل و برخورد آن‌ها با هوای گرم تبخیر به صورت آبی رخ داده و در مدت ماندگاری ذرات در محیط گرم خشک‌کن، فرایند خشک شدن تکمیل شده و ذرات پودر با رطوبت کم از انتهای خشک‌کن خارج می‌شوند. توزیع مناسب و یکنواخت ذرات خواص مارفولوژی پودر را تحت شعاع قرار داده و حلالیت ذرات را بهبود می‌بخشد. خوراک مایع توسط پاشنده‌های مختلف از جمله چرخ دوار، نازل فشاری و نازل دوسیال تبدیل به قطرات ریز می‌گردند. نازل دو سیال در محدوده وسیعی از میزان خوراک کاربرد داشته و ذرات ریز با توزیع یکنواخت تولید می‌نماید. در این نازل با برخورد هوای فشرده و خوراک در محفظه، شکست رخ داده و قطرات ریز تولید می‌گردند. دستیابی به توزیع یکنواخت و انتخاب مناسب فشار هوای نازل بر اساس میزان خوراک نیاز به دانستن الگوی جریان در داخل این نازل می‌باشد. با به‌کارگیری تکنیک شبیه‌سازی عددی دینامیک سیال¹ می‌توان تغییرات سرعت و فشار در نازل و نحوه شکست ذرات را مطالعه نمود. حرکت ذرات در نازل تابع الگوی جریان هوا بوده لذا تخمین جریان هوا با به‌کارگیری مدل‌های مناسب شبیه‌سازی آشفته‌گی ضروری است. مدل‌سازی جریان در نازل دو سیال پیچیده و مشکل بوده لذا کمتر به آن پرداخته شده است. هوانگ و همکاران برای مدل‌سازی جریان آشفته در خشک‌کن پاششی با اتمایزر دیسک دوار از مدل‌های k-ε استاندارد و RNG استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که این مدل‌ها دقیق و زمان لازم جهت حل مسئله توسط آن‌ها مناسب می‌باشد. مطالعات حاکی از این است که مدل CFD یک ابزار قوی برای ارتقاء طراحی خشک‌کن پاششی است (Huang et al., 2004a).

هوانگ و همکاران نسبت به مدل‌سازی CFD فرایند خشک شدن پاششی دارای اتمایزر فشاری اقدام کردند. این مدل، یک مدل دو بعدی تقارن محوری است. شبیه‌سازی خشک‌کن توسط نرم افزار Fluent صورت گرفته و برای شبیه‌سازی آشفته‌گی از مدل RNG استفاده شده است (Huang et al., 2004b).

هوانگ و همکاران با استفاده از مدل CFD نسبت به حل عددی انتقال اندازه حرکت، حرارت و جرم بین قطرات و هوا در خشک‌کن پاششی با اتمایزر دیسک دوار اقدام کردند. آن‌ها جهت مدل‌سازی آشفته‌گی از مدل RNG و برای پیش‌بینی خط سیر حرکت ذرات از روش تصادفی آماری استفاده کردند. نتایج به‌دست آمده شامل الگوی جریان هوا، کانتور دما و تاریخچه تغییر قطر و جرم ذرات می‌باشند. مطابق با نتایج به‌دست آمده، درصد بیشتر تبخیر در لحظه برخورد اولیه قطرات با هوا صورت می‌گیرد (Huang et al., 2005).

روستا پور و همکاران یک خشک‌کن پاششی با اتمایزر چرخ دوار را شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها نحوه خشک شدن آب لیموترش در خشک‌کن را با تلفیق روش آزمایشگاهی و عددی بررسی نموده و منحنی سینتیک خشک شدن آن را تعیین کردند (Roustapour et al., 2009).

ایشیموتو یک نازل دو سیال استفاده شده جهت سردسازی را به روش CFD مدل نمود. این محقق از یک شیوه جدید فوق آدیاباتیک بهره برد که اساس محاسبه عددی عملکرد ریزسازی نازل می‌باشد. این نازل توانایی تولید و ریزسازی دوغاب نیتروژن به وسیله برخورد گاز- مایع جریان نیتروژن مایع (LN2) با فشار تنظیم شده و دمای

¹ Computational fluid dynamic (CFD)

پایین و جریان سرعت بالای گاز بی‌دوام هلیوم (GHe) را دارد. وی همچنین تأثیرات حرارتی و چگالی را مورد بررسی قرار داد (Ishimoto, 2009).

در این تحقیق جریان هوای فشرده در نازل دو سیال به روش دینامیک سیالات محاسباتی و با استفاده از نرم‌افزار Fluent شبیه‌سازی شده است. در این راستا از مدل $k-\epsilon$ استاندارد برای شبیه‌سازی آشفستگی استفاده شد. این نازل جهت خشک‌کن پاششی خاص مورد استفاده می‌باشد.

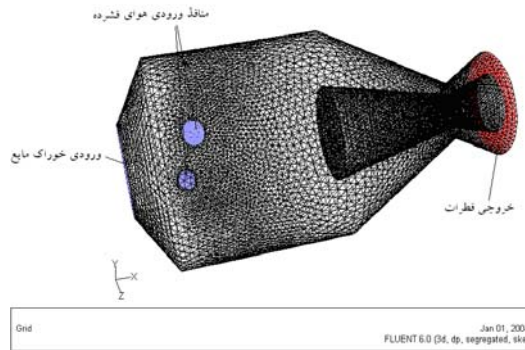
هندسه نازل

نازل دو سیال دارای یک کانال مرکزی بوده که خوراک مایع توسط یک پمپ با فشار کم به داخل محفظه سرنازل جریان می‌یابد. از طرف دیگر هوای فشرده توسط یک هادی به اطراف محفظه خوراک ارسال شده و توسط دو منفذ کوچک خارج از محور به قطر ۱ میلی‌متر به داخل محفظه سر نازل هدایت می‌شود. هوای فشرده با خوراک مایع برخورد کرده و آن را به قطرات ریز تبدیل می‌نماید. این منافذ در روبروی یکدیگر قرار ندارد و به دلیل موازی بودن یک جریان چرخشی را تولید می‌نمایند. شکل ۱ تصویر محفظه نازل دو سیال و کانال انتقال خوراک آنرا نشان می‌دهد.



شکل ۱: محفظه نازل دو سیال شامل منافذ ریز هوا

با توجه به وضعیت نامتقارن استقرار منافذ هوا، نازل را باید به صورت ۳ بعدی مدل نمود. در مرحله اول نسبت به ساخت مدل هندسی نازل توسط نرم‌افزار Gambit اقدام شد و سپس با استفاده از المان‌های هرمی مش‌بندی آن انجام پذیرفت. شکل ۲ مدل هندسی نازل دو سیال را نشان می‌دهد. خروجی نازل به صورت یک حلقه می‌باشد که پهنای حلقه در راستای شعاعی برابر با $1/33$ میلی‌متر است. نازل از یک قسمت مخروطی در ابتدا و یک قسمت استوانه‌ای به قطر $11/6$ میلی‌متر در ادامه تشکیل گردیده است. در مجرای خروجی دو مخروط وارونه در امتداد یکدیگر قرار دارد که در داخل این دو مخروط وارونه دیگر به صورت دیواره قرار گرفته که باعث تنگ شدن مجرای انتقال می‌گردد. مش مورد استفاده جهت تولید حجم کنترل شامل ۱۵۴۲۴۹ سلول می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲: مدل هندسی نازل شامل ۱۵۴۲۴۹ سلول

تعریف شرایط مرزی و حل مسئله

ورودی‌های هوای فشرده به نازل به صورت Velocity inlet تعریف گردید و مقدار سرعت در لحظه ورود به محفظه نازل از طریق منافذ با داشتن سطح مقطع آن‌ها و جریان هوای ورودی محاسبه گردید. سرعت جریان هوا در دهانه منافذ برابر با $517/54 \text{ m/s}$ می‌باشد. قطر هیدرولیکی برابر با قطر منافذ ورودی هوا، ۱ میلی‌متر، تعریف شد. هوا با شدت آشفته‌گی حدود ۲۰ درصد و موازی با محور Y وارد محفظه می‌شود. خروجی نازل به صورت Out flow تعریف شد لذا شرایط خروجی توسط مدل ارائه می‌گردد. تمامی دیواره‌ها بدون حرکت و با شرط عدم لغزش تعریف شده است. برای مدل‌سازی آشفته‌گی در نازل از مدل k-ε استاندارد استفاده شد. این مدل برای شبیه‌سازی و حل آشفته‌گی جریان مناسب است. مدل k-ε شامل دو معادله برای تشریح آشفته‌گی جریان است و نسبتاً دقیق و ساده می‌باشد. این مدل برای بیان انتقال خواص آشفته‌گی توسط جریان متوسط و نفوذ و نیز برای تولید و استهلاك آشفته‌گی مناسب است. در این مدل دو معادله انتقال دیفرانسیل جزئی یکی برای انرژی جنبشی آشفته (k) و دیگری برای نرخ استهلاك انرژی جنبشی آشفته (ε) ارائه گردیده است. مدل استاندارد یک مدل نیمه تجربی است که بنای آن معادلات انتقال انرژی جنبشی آشفته و نرخ استهلاك انرژی می‌باشد. معادلات دیفرانسیل جزئی k و ε برای جریان تراکم‌ناپذیر و گذرا به ترتیب طبق روابط (۱ و ۲) می‌باشد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2)$$

در این روابط،

$$k = \text{انرژی جنبشی آشفته، } \text{m}^2/\text{s}^2$$

$$\mu_t = \text{لزجت آشفته‌گی، } \text{kg/m.s}$$

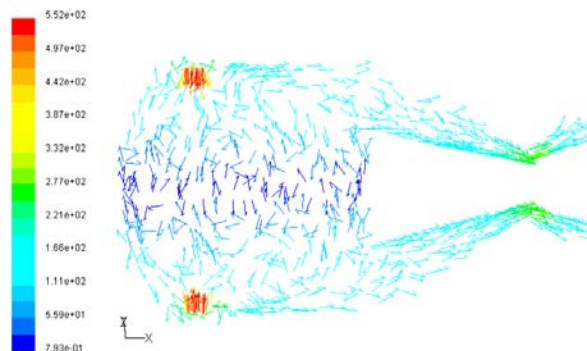
$$\varepsilon = \text{نرخ استهلاك آشفته، } \text{m}^2/\text{s}^3$$

$$\rho = \text{جرم حجمی سیال، } \text{kg/m}^3$$

G_k در رابطه (۱) نشان دهنده نرخ تولید انرژی جنبشی آشفته به علت تغییرات سرعت متوسط است. برای حل جریان آشفته در نازل با فرض تراکم‌ناپذیر بودن جریان و عدم اثر متقابل جریان پیوسته هوا و قطرات به‌عنوان فاز گسسته از حل‌کننده segregated استفاده شده است. فرمول‌بندی به صورت implicit در نظر گرفته شد و با تعریف سرعت‌ها به صورت مطلق مسئله جهت حل آماده گردید. مدل به صورت سه بعدی و از نظر زمانی به صورت پایدار فرض شد و معادلات تا دستیابی به دقت 10^{-16} حل شد.

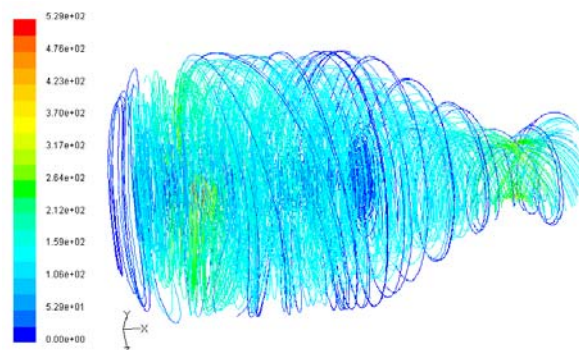
نتایج و بحث

نتایج حاصل از بردارهای سرعت در برش طولی در صفحه گذر از منافذ ورودی هوا در شکل (۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است سرعت در هسته مرکزی دارای کمترین مقدار و در ورودی هوا دارای بیشترین مقدار می‌باشد. البته در مجرای خروجی به دلیل تنگ شدن مجرا افزایش سرعت مشاهده می‌گردد.



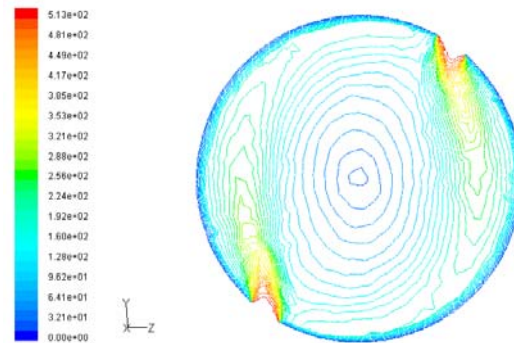
شکل ۳: کانتور بردار سرعت متوسط در محفظه نازل

کانتور خطوط جریان را می‌توان در شکل ۴ مشاهده نمود که بیانگر حرکت کاملاً چرخشی در محفظه نازل می‌باشد. نحوه خروج سیال از نازل را که به صورت مخروط توخالی و با جریان کاملاً چرخشی و یکنواخت به سمت جلو می‌باشد را می‌توان به‌وضوح مشاهده نمود. با توجه به شرط عدم لغزش، در مرز دیواره‌های نازل سرعت به صفر رسیده است.



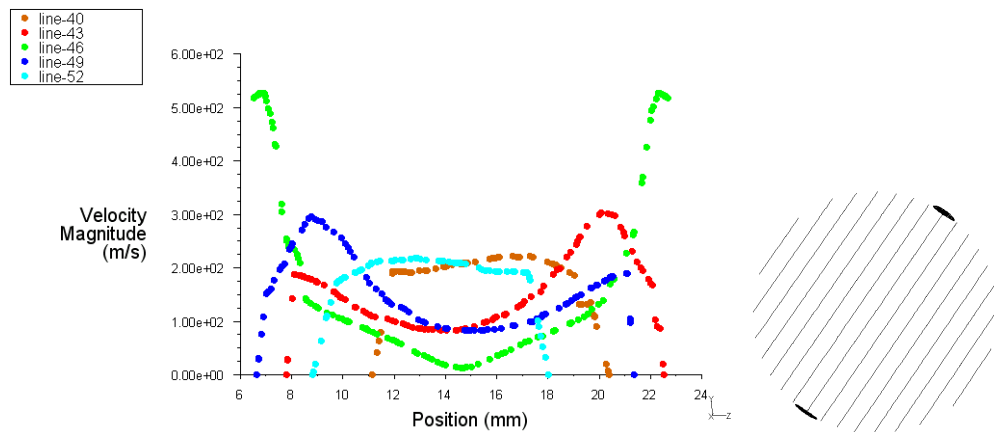
شکل ۴: کانتور خطوط جریان در محفظه نازل

شکل ۵ کانتور جریان در مقطع برشی عمود بر محور نازل و در محل ورودی هوا را نشان می‌دهد. خطوط کانتور موید این مطلب است که جریان به صورت مماسی با سرعت حداکثر در راستای Y وارد شده و در مرکز سرعت به حداقل رسیده است. همانطور که مشاهده می‌شود هسته‌های دورانی تشکیل شده دارای مقطع دایره‌ای نبوده و دارای مقطع تقریباً بیضوی است. این نوع جریان به علت تاثیر ورودی‌های متقابل هوا بر یکدیگر می‌باشد.



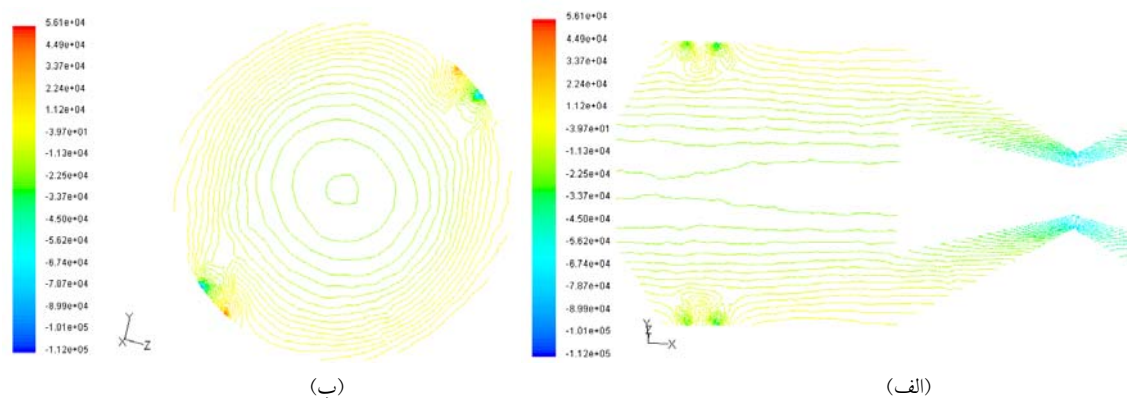
شکل ۵: کانتور جریان در مقطع ورودی هوا به نازل

شکل ۶ منحنی‌های تغییرات سرعت در مقطع برشی نشان داده شده در ورودی هوا به محفظه نازل را نشان می‌دهد. خطوط بررسی شده موازی با خط واصل مرکزی دو ورودی هوا می‌باشد. نمودار این خط واصل با رنگ سبز نشان داده شده و کاملاً متقارن است. در نواحی ورودی هوا، سرعت جریان ماکزیمم مقدار خود را داشته و سپس با شیب تندی به سمت مرکز نازل افت کرده و به صفر میل می‌کند. در این ناحیه تاثیر ورودی هوا به شدت کاهش یافته است. منحنی آبی پررنگ و قرمز با فاصله یکسان و در طرفین خط واصل مرکزی واقع شده‌اند. با توجه جریان مماسی و متقابل منافذ ورودی هوا به نازل، این دو منحنی کاملاً قرینه یکدیگرند. در هر دو منحنی، با نزدیک شدن به مرکز نازل سرعت کاهش می‌یابد. منحنی‌های نشان داده شده با آبی کمرنگ و قهوه‌ای، تغییرات سرعت در طرفین خط واصل و در فواصل دورتر از آن را نشان می‌دهند. این دو منحنی نیز قرینه عکس یکدیگر هستند با این تفاوت که نمودار آن‌ها به سمت مرکز نازل صعودی است و این به دلیل موقعیت قرارگیری این خطوط و فاصله‌ای که از محور مرکزی دارند می‌باشد.



شکل ۶: تغییرات سرعت متوسط در مقطع ورودی هوا به نازل

در شکل (۷) کانتورهای فشار استاتیکی نشان داده شده است. مطابق با شکل (۷ الف) در مجرای خروجی به دلیل تنگ شدن مجرا فشار افت نموده است. با توجه به شکل (۷ ب) در قسمت ورودی فشار حداکثر مقدار خود را داشته و مساوی 56100 Pa می باشد. در ناحیه ورودی و در نزدیکی دیواره نیز یک ناحیه کوچک با فشار منفی به چشم می خورد که می تواند نشانگر وجود جریان برگشتی باشد.



شکل ۷: کانتور فشار در نازل

نتیجه گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از مدل سازی سرعت جریان در نازل، بیشترین سرعت در محل ورودی های هوا وجود داشته که با دور شدن از این نواحی و نزدیک شدن به مرکز نازل سرعت تحلیل یافته به طوریکه در مرکز کمترین سرعت مشاهده می شود. در ناحیه مرکزی، جریان به صورت گردابه های با سرعت کم ایجاد می شود. اثر متقابل ورودی جریان از دو منافذ هوا باعث می شود که گردابه های جریان تشکیل شده بیضوی شکل باشند. سرعت جریان نیز با دور شدن از نواحی ورودی و نزدیک شدن به خروجی نازل کاهش می یابد منتهی در انتهای مسیر به علت تنگ شدن مجرا افزایش سرعت مشهود است. کانتور فشار نیز نشانگر کاهش فشار با دور شدن از نواحی ورودی هوا در امتداد شعاعی و نزدیک شدن به محور مرکزی نازل می باشد. با ادامه جریان به سمت خروجی نازل فشار توسعه می یابد منتهی در قسمت خروجی شاهد افت فشار به علت تنگ شدن مجرا خواهیم بود.

فهرست منابع

- 1- Huang, L., Kumar K., and Mujumdar A.S. 2004a. Simulation of spray evaporation using pressure and ultrasonic atomizer- a comparative analysis. Russian TSTU Transaction. (English Version). 10(1A), 83-100.
- 2- Huang, L., Kumar K., and Mujumdar A.S. 2004b. Computational fluid dynamic simulation of droplet drying in a spray dryer. Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), Brazil, 22-25 August. Vol. A, 326-332.
- 3- Huang, L., Kumar K., Passos, M.L. and Mujumdar A.S. 2005. A three- dimensional simulation of a spray dryer fitted with a rotary atomizer. Drying Technology. 23(1), 1-15.
- 4- Ishimoto, J. 2009. Numerical study of cryogenic micro-slush particle production using a two-fluid nozzle. Cryogenics. 49: 39-50.
- 5- Roustapour, O.R., Hosseinalipour, M., Ghobadian, B., Mohaghegh, F. and Maftoon Azad, N. 2009. A proposed numerical-experimental method for drying kinetics in a spray dryer. Journal of Food Engineering. 90, 20-26.