

شبیه‌سازی عددی و بررسی تجربی اثر تجهیز استوانه‌ای شکل برای رفع مشکل اضافه ضخامت در لبه‌های ورق گالوانیزه در فرایند جت شویی

محسن ثقفیان*، سید مهدی مدرس زاده و محمد هادی استکی
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۹/۱۲/۱۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۰/۱۱/۱۲)

چکیده -

واژگان کلیدی:

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: saghafian@cc.iut.ac.ir

Numerical and Experimental Investigation of Using a Proposed Cylindrical Device to Prevent Edge Over-thickness in Jet Wiping Process

M. Saghafian, S.M. Modareszaheh and M.H. Esteki
Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: Hot-dip galvanizing process is simulated numerically. Over-thickness near the strip edge called edge over-coating in continuous hot-dip galvanizing process is a universal problem. Numerical results of using a cylindrical device installed at jet exit are presented to prevent over-thickness near the strip edges. This device prevents jets from colliding with each other in the region outside the strip and reduces flow oscillations. In addition to numerical investigation, cylindrical device is tested experimentally in Mobarakeh Steel Complex. Numerical and experimental results show that the installed device is very effective in reducing over-thickness near the strip edge, but cannot completely solve the problem.

Keywords: Galvanizing, Jet wiping, Edge over-thickness, cylindrical device

مولفه سرعت در راستای طولی ورق	u	گرمای ویژه در فشار ثابت	C_p
جملات تنش رینولدز	$\overline{u'_i u'_j}$	ثابت مدل توربولانس	C_μ
سرعت خروجی جریان جت	V_{jet}	ثابت مدل توربولانس	$C_{1\epsilon}$
راستای طولی ورق	X	ثابت مدل توربولانس	$C_{2\epsilon}$
راستای عمود بر ورق	Y	اندازه دهانه خروجی جت	d
$y^+ = \frac{y\sqrt{\tau/\rho}}{\nu}$ فاصله بی بعد از دیوار		انرژی	E
راستای عرضی ورق	Z	شتاب جاذبه زمین	g
چگالی	ρ	فاصله میان دو جت از یکدیگر	H
نرخ استهلاک اغتشاش	ϵ	ضخامت لایه مذاب در طول ورق	$h(x)$
ضریب هدایت گرمایی	λ	انتالپی	i
ویسکوزیته	μ	انرژی اغتشاشی	k
دلتای کرونگر	δ_{ij}	فشار استاتیکی	P
ویسکوزیته سینماتیکی	ν	فشار هوای محیط	P_a
ویسکوزیته سینماتیکی اغتشاشی	ν_t	نرخ تولید انرژی جنبشی اغتشاشی	P^k
تنش برشی	τ	فشار تغذیه جتها	P_S
عدد پراتل	Pr_t	تانسور کرنش متوسط	S_{ij}
عدد پراتل انرژی جنبشی اغتشاش	σ_k	دما	T
نسبت مقادیر گرمای ویژه	γ	ضخامت بی بعد لایه مذاب در طول ورق	$Tc(x)$
گام زمانی	Δt	دمای هوای خروجی از جت	T_{jet}
عدد پراتل نرخ اتلاف اغتشاش	σ_ϵ	سرعت ورق	U_o

حوضچه می‌شود، فرایند جت شوئی^۱ نام گرفته است. شکل (۱) نمای واقعی از ناحیه مورد مطالعه که مربوط به خط تولید گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه است را نمایش می‌دهد.

مشکل عمومی این روش تولید، اضافه ضخامت پوشش فلز "روی" در نزدیکی لبه ورق است. ضخامت پوشش در چند سانتیمتری لبه گاه تا چند برابر نسبت به مرکز ورق افزایش می‌یابد. این مسئله به معنای کاهش کیفیت تولید و افزایش مصرف فلز "روی" بوده و باعث مشکلاتی در بسته بندی می‌شود. به همین دلیل این مسئله یکی از موارد مهم پژوهشی در زمینه فرایندهای پوشش دهی به شمار می‌رود.

در سال ۱۹۷۶، بلتائوس [۱] برخورد جریان جت به ورق را به صورت تجربی مورد مطالعه قرار داد و روابطی را بر حسب پارامترهای هندسی و فیزیکی جت، ارائه داد. لیندگرن [۲] شبیه سازی عددی و تجربی جت و لایه مذاب را به صورت دو بعدی انجام داد. مطالعات او مربوط به خط تولید شرکت ساب^۲ بوده است. ابتدا از رابطه توزیع فشار و تنش برشی ارائه شده توسط الن و تو [۳] استفاده کرد. سپس با داشتن توزیع فشار و تنش برشی ناشی از جت بر روی سطح ورق جریان مذاب فلز "روی" توسط معادلات نویر استوکس جداگانه مورد تحلیل قرار گرفت. لیندگرن از رابطه توزیع فشار بر اساس کارهای نظری و تجربی الن و تو، برای بخشی از ناحیه برخورد جت با ورق استفاده کرد و مطابقت خوبی با کارهای تجربی موجود داشت. لیندگرن تأکید کرده است که ضخامت پوشش وابسته به سه عامل سرعت ورق، فشار تغذیه جت و فاصله جت تا ورق است. در حالتی هم که نقطه انجماد نزدیک جت اتفاق افتد تغییرات زیاد در ویسکوزیته را شاهد هستیم. لیندگرن با انتگرال گیری از پروفیل سرعت دبی حجمی پوشش مذاب "روی" را محاسبه کرده که با استفاده از آن ضخامت پوشش به دست می‌آید. بررسی صورت گرفته توسط لیندگرن [۲] نشان می‌دهد که نقطه انجماد به سرعت ورق، فشار تغذیه جت (یا سرعت هوای خروجی از جت) و فاصله جت تا ورق بستگی دارد. محل انجماد "روی" می‌تواند از حوالی محل برخورد جت

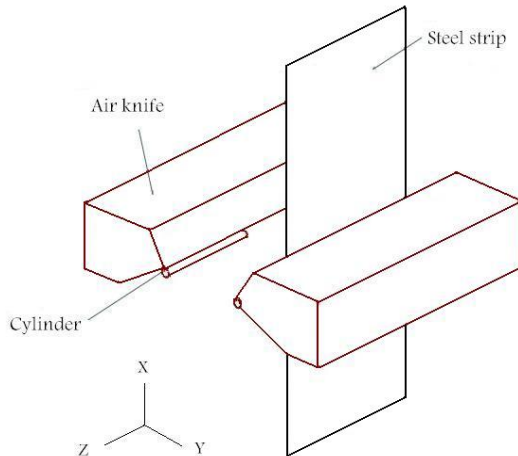
یکی از روشهای تولید ورق گالوانیزه پوشش دهی به روش غوطه‌وری است. در خط تولید ورق گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه از روش پوشش دهی به صورت غوطه وری در حوضچه داغ^۱ "روی" استفاده می‌شود. در خط تولید کلافهای ورودی از خط نورد سرد، در ابتدای خط گالوانیزه به یکدیگر جوش خورده و به صورت یک نوار به خط پیوسته شارژ می‌شوند. در قسمت شست و شو، سطح ورق با مواد قلیایی چربی زدایی و برس زنی و با آب گرم شست و شو و تمیز شده و سپس با هوای داغ خشک می‌شود. سپس کلاف تمیز شده وارد کوره‌های آنیل می‌شود که در آن ورق طی سه مرحله پیشگرم^۲، گرمایش^۳ و همدمایی^۴، متناسب با کاربرد محصول، آنیل شده و دمای آن برای ورود به حوضچه داغ "روی"^۵، توسط سیستم خنک کننده، تنظیم می‌شود. ورق پس از گذر از داکت اسنوت به داخل حوضچه مذاب وارد می‌شود. هدایت ورق در حوضچه توسط چند غلطک به صورت پشت سر هم انجام می‌گیرد. داکت اسنوت (مجرای پوزه‌ای شکل)^۶، انجام ایزوله اتمسفری کوره و ارتباط بین کوره و حوضچه را برعهده دارد و برای برآورده شدن این هدف، تا داخل مذاب، وارد شده است. با خروج ورق، از حوضچه داغ "روی"، لایه نازکی از فلز "روی"، بر هر دو سطح ورق می‌نشیند. بلافاصله پس از خروج از مذاب، جت هوا به سطح ورق، برخورد کرده و ضخامت پوشش را تنظیم می‌کند. در مرحله بعد، اندازه گل بوته‌های پوشش گالوانیزه، با تنظیم سیکل خنک کاری، کنترل می‌شود. در حین فرایند، دمش هوا، دمای ورق را کاهش می‌دهد. شایان ذکر است، ضخامت پوشش ورق، توسط دستگاه ضخامت سنج^۷، کنترل می‌شود. همان طور که اشاره شد، بلافاصله پس از خروج ورق از حوضچه مذاب، جت هوا به سطح ورق، برخورد کرده و در اثر فشار هوای وارده از طرف جت هوا بر ورق و همچنین نیروی ثقلی مذاب "روی"، بخشی از مذاب به داخل حوضچه مذاب، بر می‌گردد و در نتیجه ضخامت پوشش تنظیم می‌شود. فرایند دمش هوا با جت هوا، که باعث بازگشت مذاب به داخل



شکل ۱- نمای واقعی از حرکت ورق در میان جتها

کامبارو [۵] فیلمهای نازک مایع در سطوح شیبدار خروجی از مخزن مایع را مدلسازی کردند. نتایج آنها برای شرایط سینماتیکی و هندسی مختلف ارائه شده است. استخراج یک راه حل تحلیلی برای ضخامت لایه مایع در گستره‌ای وسیع از فاصله سطح آزاد مایع و برای هر زاویه سطح بین ۰ تا ۹۰ درجه را می‌توان از نتایج کار آنها بر شمرد. نافاده و همکاران [۶] مدلسازی عددی جریان جت برخوردی به دیوار را به صورت دو بعدی توسط نرم افزار فلوئنت را انجام داده و توزیع فشار و تنش برشی را بر روی دیوار محاسبه کردند. مهمترین هدف کار آنها به دست آوردن وزن پوشش یکنواخت روی ورق بود. آنها از مدل اغتشاش $k - \epsilon$ (RNG) برای جت استفاده کردند. جین و همکاران [۷] فقط شبیه سازی فیلم مذاب توسط نرم افزار فیدپ^{۱۲} را انجام دادند. آهن و چونگ [۸] با هدف بررسی مشکل اضافه ضخامت در لبه‌ها ابتدا جت را به کمک نرم افزار استار سی دی شبیه سازی و سپس ضخامت لایه مذاب را توسط یک روش تحلیلی انتگرالی به دست آوردند. آنها توزیع تنش برشی و گرادیان فشار جت سه بعدی را به دست آورده و از آنها به عنوان شرط مرزی روی سطح مذاب استفاده کرده‌اند. آنها سپس با توجه به دیگر شرایط مرزی معادله‌های پیوستگی و ممتم را در حالت دو بعدی برای لایه مذاب حل کرده و پس از محاسبه توزیع سرعت داخل لایه مذاب، در هر مقطع از طول ورق ضخامت پوشش را به دست آوردند. شکل (۲) به صورت شماتیک فرایند بررسی شده توسط آنها را نشان می‌دهد. در پژوهش عددی آهن و چونگ، همینطور اثر نصب یک میله استوانه‌ای نازک (با قطرهای ۳، ۴ و ۵ میلیمتر) در لبه پایینی جت و در محدوده خارج از لبه‌های ورق شکل (۳)، بر روی توزیع فشار و تنش برشی مورد بررسی قرار گرفته و نصب چنین وسیله‌ای به عنوان یک راهکار پیشنهاد شده است. بر اساس گزارش آنها مشکل اضافه ضخامت با این راهکار در مسئله مورد حل که نسبتاً خط تولید کوچکی است، کاملاً حل می‌شود. لاکانه و همکاران [۹] یک تحلیل عددی و تجربی بر روی فرایند جت شویی انجام دادند. آنها حل معادلات ناویر استوکس و

تا چند متر بالاتر از آن متغیر باشد. کیم و همکاران [۴] به بررسی مشکل اضافه ضخامت در لبه‌های ورق گالوانیزه پرداختند. آنها ایجاد گردابه‌هایی که به علت برخورد دو جریان جت مقابل یکدیگر، در ناحیه لبه ورق به صورت متناوب پدید می‌آید را عامل اضافه ضخامت دانستند. در کار آنها اضافه ضخامت نزدیک لبه ورق گالوانیزه به طور عددی تحلیل شد. میدان جریان سه بعدی نیز به همراه گردابه‌های متناوب در نظر گرفته شده و توزیع متوسط فشار و تنش برشی روی سطح ورق توسط نرم افزار استار سی دی^{۱۱} به دست آمد. کیم و همکاران تأکید کردند که گردابه‌های متناوب علت کاهش تدریجی فشار سطحی نزدیک لبه ورق است. آنها ضخامت پوشش به وسیله یک روش انتگرالی از معادله ممتم محاسبه کردند. آنها توزیع سرعت مذاب را به صورت سهموی فرض کردند و با در نظر گرفتن سه شرط مرزی سرعت مذاب و تنش برشی بر روی دیواره متحرک و تنش برشی روی لایه مذاب، توزیع سرعت را به دست آوردند. سپس توزیع را در معادله ممتم گذاشته و با انتگرال گیری جمله به جمله از سطح ورق تا ضخامت لایه مذاب رابطه‌ای برحسب گرادیان فشار، تنش برشی، ضخامت، چگالی، ویسکوزیته مذاب و سرعت ورق به دست آمد. با در نظر گرفتن دبی حجمی ثابت برای لایه مذاب و انتگرال گیری توزیع سرعت از سطح ورق تا لایه مذاب، ضخامت پوشش به دست می‌آید. طرح پیشنهادی آنها برای رفع مشکل اضافه ضخامت، نصب بافل^{۱۱} در لبه‌های ورق بود. پودوسکی و



شکل ۳- طرح پیشنهادی توسط آهن و چونگ [۸]

توزیع ضخامت پوشش در عرض ورق هم به صورت عددی شبیه سازی می شود. علاوه بر آن با انجام آزمایش در خط تولید مجتمع فولاد مبارکه، نتایج به دست آمده از شبیه سازی عددی برای ضخامت پوشش با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می شود.

۲- معادلات حاکم و روش حل جریان جت هوا

در کار حاضر جریان جت هوا، تراکم پذیر، مغشوش و ناپایاست. معادلات حاکم، معادله پیوستگی و منتم و انرژی هستند. معادله بقای جرم (معادله پیوستگی) به شکل معادله (۱) است:

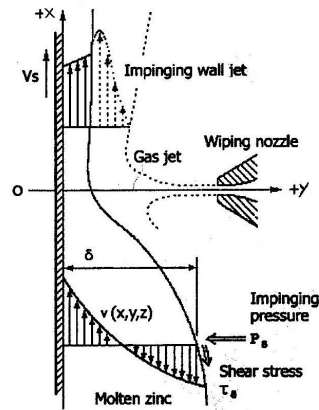
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

معادلات نویر- استوکس متوسط گیری شده رینولدز^{۱۳} حاکم بر جریان به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

در این معادله P فشار، u سرعت، ρ چگالی و ν ویسکوزیته سینماتیکی است. $\overline{u'_i u'_j}$ جملات تنش رینولدز هستند که باید مدل شوند. در کار حاضر برای جملات تنش رینولدز، از مدلهای k-ε استفاده می شود.

$$\overline{u'_i u'_j} = -2\nu_t S_{ij} + \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3)$$



شکل ۲- مدل دو بعدی از فرایند جت شویی [۸]

پیوستگی را برای جت و لایه مذاب با دخالت دادن پارامتر تابع فاز به طور همزمان حل کردند. در این روش اثر کشش سطحی در لایه مذاب به عنوان جمله چشمه وارد معادله ممتن می شود.

گوست و بوچلین [۱۰] به صورت تجربی به اثرات پاشش در فرایند جت شویی پرداختند. سیال استفاده شده در آزمایشهای آنان آب بوده است. دو نوع طراحی به همراه زاویه های مختلف برای نازل در نظر و مورد آزمایش قرار گرفت. نتیجه کار آنها کاهش ناپایداری بود. کوان و کیم [۱۱] اثر هندسه نازل جت را به صورت عددی و دو بعدی، بر روی ضخامت پوشش بررسی کردند. آنها گزارش کرده اند که قطر دهانه بیشتر منجر به کاهش ضخامت پوشش می شود.

در پژوهش حاضر، فرایند پوشش دهی ورق گالوانیزه به صورت سه بعدی بررسی می شود. هدف از آن بررسی مشکل اضافه ضخامت پوشش در نزدیکی لبه های ورق است. برای این منظور اثرات سه بعدی جریان جتهای هوای برخوردی به ورق که در لبه های آن باعث تغییر الگوی توزیع فشار و تنش برشی می شود مورد مطالعه قرار می گیرد. این اثرات می تواند باعث افزایش ضخامت پوشش در نزدیکی لبه ها شود. راهکاری برای حل یا حداقل کاهش مشکل (با نصب یک تجهیز جدید که در دهانه خروجی جتها) مورد بررسی قرار می گیرد. اثر تجهیز روی جریان جت هوا به صورت عددی شبیه سازی شده و نهایتاً

v_t ویسکوزیته سینماتیکی اغتشاشی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

δ_{ij} دلتای کرونگر و S_{ij} تانسور کرنش متوسط است.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

معادله انرژی نیز به صورت زیر است:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \frac{\rho C_p v_t}{Pr_t} \quad (7)$$

که در آن T دما، C_p مقدار ویژه گرمایی در فشار ثابت و λ ضریب هدایت گرمایی است و $Pr_t = 0.85$ است. همچنین E برابر معادله زیر است که در آن i انتالیپی است.

$$E = i - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (8)$$

در این پژوهش از مدل اغتشاشی $k-\varepsilon$ به صورت زیر استفاده می‌شود [۱۲]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P^k - \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P^k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \quad (10)$$

P^k نرخ تولید انرژی جنبشی اغتشاشی است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P^k = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 2v_t S_{ij} S_{ij} \quad (11)$$

عدد پراتل انرژی جنبشی اغتشاش $\sigma_k = 1$ و عدد پراتل نرخ اتلاف اغتشاش $\sigma_\varepsilon = 1.3$ است. $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ، $C_{\mu} = 0.09$ و $C_{2\varepsilon} = 1.92$ است. دو نوع تابع دیواره استاندارد و تابع دیواره بهبود یافته^{۱۴} مورد بررسی قرار گرفت. شبکه حل به گونه‌ای است که y^+ برای گره‌های مجاور دیوار در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. بر روی ورق و سطوح مربوط به بدنه جت از شرط

مرزی دیوار صلب استفاده شده است. شدت اغتشاش^{۱۵} جریان در خروجی جت (ورودی به میدان حل) ۱ درصد در نظر گرفته شده است. در گسسته‌سازی جملات جابه‌جایی معادلات ممتنم و انرژی از روش کوئیک^{۱۶} و برای معادلات k و ε از هیبرید^{۱۷} استفاده شد. از الگوریتم سیمپل سی^{۱۸} برای حل میدان جریان استفاده می‌شود. درکار حاضر عدد ماخ جریان هوا در خروجی جت حدود ۰/۶۵ است.

۳- معادلات حاکم و روش حل لایه مذاب

پس از حل جریان جت هوا، توزیع فشار و تنش برشی که ایجاد شده بر روی لایه مذاب روی سطح ورق تعیین‌کننده ضخامت پوشش است. جریان سیال مذاب "روی آرام، تراکم‌ناپذیر و دائم فرض می‌شود. معادلات حاکم بر لایه مذاب معادلات بقای جرم و ممتنم هستند. معادله بقای جرم به شکل معادله (۱۲) است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

معادله ممتنم به شکل معادله (۱۳) استفاده می‌شود.

$$0 = -\nabla P + \rho g + \mu \nabla^2 u \quad (13)$$

در این معادله P فشار، ρ چگالی و μ ویسکوزیته مذاب "روی"، g شتاب جاذبه زمین و u مولفه سرعت در راستای طولی ورق هستند. در کار حاضر ویسکوزیته ثابت فرض شده است. تغییرات در راستای طولی ورق (x) شدید نیست لذا از جملات اینرسی صرف نظر شده است. با توجه به ناچیز بودن ضخامت لایه مذاب از سرعت در جهت عمود بر حرکت ورق چشم‌پوشی می‌شود. با استفاده از شرط مرزی عدم لغزش روی ورق و با فرض معلوم بودن توزیع فشار و تنش برشی روی سطح لایه مذاب و حل معادله ممتنم پروفیل سرعت به دست می‌آید.

$$u(x, y) = \left(\frac{y^2}{2\mu} - \frac{y \cdot h(x)}{\mu} \right) \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \right) + \frac{\tau(x) \cdot y}{\mu} + U_0 \quad (14)$$

$h(x)$ ضخامت لایه مذاب در طول ورق و مجهول است. U_0 سرعت ورق است. دبی حجمی در هر مقطع به صورت معادله

به دست می آید. با داشتن یک q ثابت و حل معادله (۱۶) ضخامت $h(x)$ در طول ورق به دست می آید [۲]. برای محاسبه گرادیان فشار و تنش برشی بدون بعد از معادلات زیر استفاده می شود.

$$G = 1 + (dp/dx) / \rho_{melt} g \quad (19)$$

$$S = \tau(\mu\rho U_o g)^{-1/2} \quad (20)$$

τ تنش برشی است. همچنین ضخامت لایه مذاب "روی" به صورت زیر بدون بعد می شود:

$$Tc(x) = h(x)(g/vU_o)^{1/2} \quad (21)$$

$\nu = \mu/\rho$ ویسکوزیته سینماتیکی مذاب "روی" است.

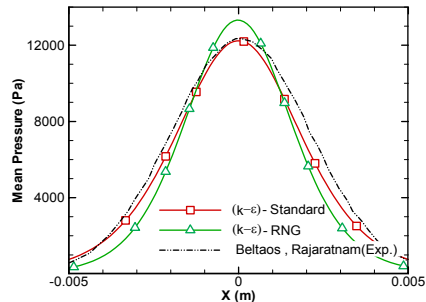
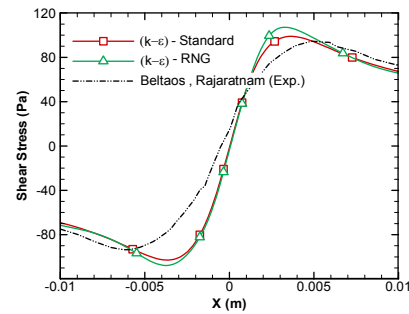
۴- اعتبار سنجی و مطالعه شبکه با شبیه سازی دو بعدی

با توجه به عدم وجود نتایج تجربی برای جریان هوا و توزیع فشار و تنش برشی روی سطح ورق در خط گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه به منظور اعتبارسنجی مدل، در ابتدا جریان جت برخوردی به ورق در حالت دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته، نتایج با نتایج تجربی بلتاوس و راجاراتنام [۱۴] مقایسه می شود. برای اعتبار سنجی شرایطی را که الن و تو [۳] برای جت در نظر گرفتند و با آن ضخامت پوشش را بر روی ورق محاسبه کردند در نظر گرفته شده است. در کار آنها دهانه نازل خروجی جت شکافی ۱ میلیمتر، سرعت ورق $U_o = 100 \text{ m/min}$ ، نسبت فشار تغذیه جت به فشار محیط ۱/۳۶ و فاصله جت تا ورق $Y = 20 \text{ mm}$ بوده است. با استفاده از معادله (۲۲) [۱۳] سرعت خروجی جت برابر $V_{jet} = 225.25 \text{ m/s}$ به دست می آید.

$$V_{jet} = \sqrt{2R \left(\frac{\gamma}{\gamma-1} \right) T_{jet} \left(1 - \left(\frac{P_a}{P_a + P_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right)} \quad (22)$$

شکل (۴) توزیع فشار را برای مدل‌های مختلف $k-\omega$ و $k-\epsilon$ در مقایسه با نتایج تجربی موجود نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود مدل $k-\epsilon$ استاندارد، با تابع دیوار بهبود یافته نتایج بهتری را ارائه می کند.

مطالعه شبکه^{۱۹}: برای مطالعه شبکه، ابتدا سه شبکه مختلف در



شکل ۴- مقایسه توزیع فشار و تنش برشی در طول ورق با مدل‌های مختلف توربولانس

(۱۵) به دست می آید.

$$q = \int_0^h u(x, y) dy \quad (15)$$

با جای گذاری توزیع سرعت در معادله (۱۵) معادله (۱۶) را خواهیم داشت.

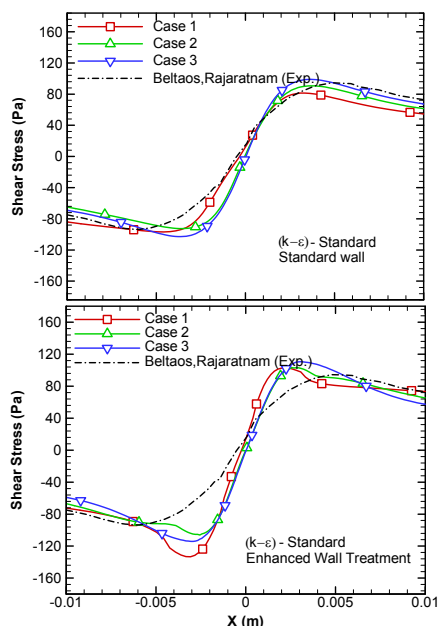
$$q = -\frac{h(x)^3}{3\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \right) + \frac{h^2 \tau(x)}{2\mu} + U_o h(x) \quad (16)$$

فرض می شود که دبی حجمی مذاب بعد از برخورد جت در جهت x و دبی حجمی نسبت به ضخامت $h(x)$ ثابت است. از معادله دبی یکبار بر حسب x و یکبار بر حسب h مشتق گرفته و برابر صفر قرار داده می شود.

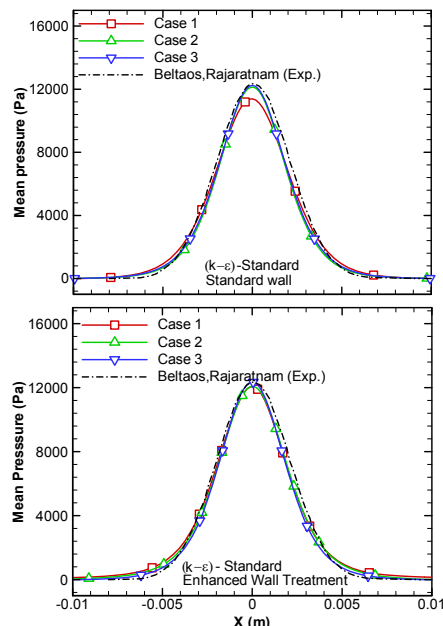
$$\frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial q}{\partial h(x)} = 0 \quad (18)$$

از حل این دو معادله یک نقطه x و مقدار ضخامت در این نقطه به دست می آید. تنش برشی و فشار در این نقطه را به دست می آوریم. با جای گذاری مقادیر به دست آمده، یک دبی ثابت



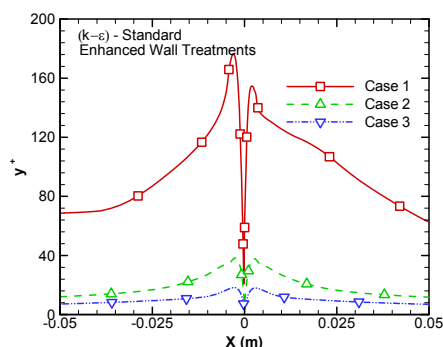
شکل ۶- توزیع تنش برشی در طول ورق با سه شبکه مختلف



شکل ۵- توزیع فشار در طول ورق با سه شبکه مختلف

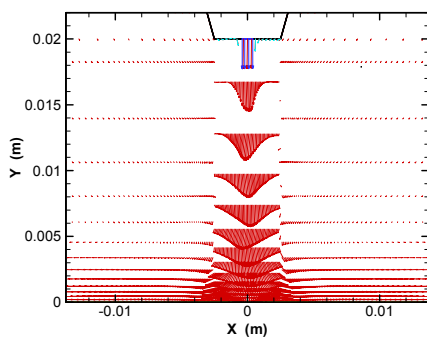
همان طور که ملاحظه می‌شود شبکه (۲) و (۳) نتایج بسیار خوبی را در مقایسه با نتایج تجربی بلتاوس و راجاراتنام [۱۴] ارائه می‌کنند. همخوانی بیشتر در تمامی شبکه‌ها در حالتی که از مدل رفتار دیواره بهبود یافته استفاده شده نسبت به تابع دیواره استاندارد در توزیع فشار واضح است.

تغییرات y^+ در طول دیواره، برای اولین گره شبکه در مجاورت دیواره نیز برای سه شبکه با روش توربولانس $k-\epsilon$ با تابع دیواره استاندارد در شکل (۷) مقایسه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است y^+ در شبکه اول از محدوده مجاز فاصله زیادی دارد ولی برای شبکه دوم و سوم در محدوده بهتری قرار می‌گیرد. شکل (۸) کانتورهای انرژی جنبشی و نرخ استهلاک توربولانس برای شبکه سوم را نشان می‌دهد. بیشترین انرژی اغتشاش مربوط به جریان خروجی جت و نیز در مقابل جت است. شکل (۹) بردارهای سرعت جریان جت خروجی را نشان می‌دهد. سرعت در خروجی نازل دارای پروفیل یکنواخت و سپس به حالت سهموی تبدیل و با فاصله گرفتن از نازل، ماکزیمم سرعت کاهش و ضخامت جت افزایش می‌یابد.

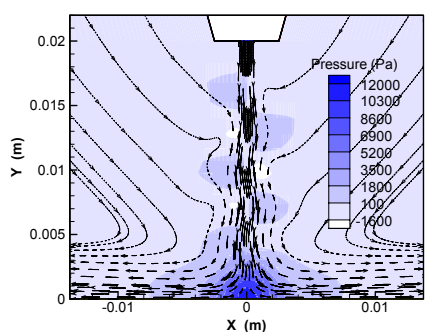


شکل ۷- تغییرات y^+ در طول ورق برای اولین گره مجاور ورق با سه شبکه مورد مطالعه

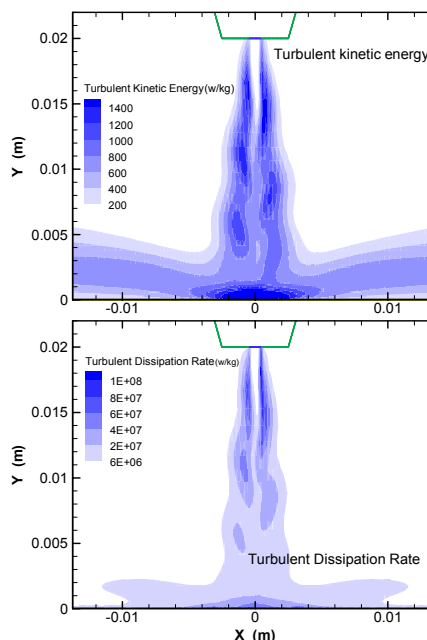
حالت ۲ بعدی ساخته شد. سه شبکه انتخابی به ترتیب دارای ۲۸۰۰، ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰ سلول‌اند. شبکه ساخته شده به گونه‌ای است که در مجاورت دیواره و نزدیک جت تراکم گره‌هاست. شکل‌های (۵) و (۶) توزیع فشار و تنش برشی در طول ورق و روی سطح آن برای شبکه‌های گوناگون با مدل اغتشاش $k-\epsilon$ استاندارد در دو حالت تابع دیواره استاندارد و رفتار دیواره بهبود یافته در مقایسه با نتایج تجربی را نشان می‌دهند.



شکل ۹- بردارهای سرعت جریان



شکل ۱۰- خطوط جریان به همراه کانتورهای فشار



شکل ۸- کانتورهای انرژی جنبشی و نرخ استهلاك توربولانس

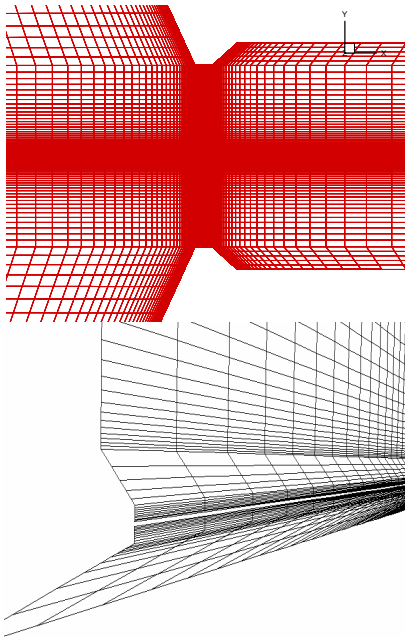
شکل (۱۰) خطوط جریان به همراه کانتورهای فشار را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود محل وقوع ماکزیمم فشار مربوط به مرکز و بر روی ورق است.

ضخامت پوشش: پس از حل جریان جت هوا، توزیع فشار و تنش برشی بر روی ورق متحرک به دست می‌آید و به عنوان شرط مرزی در محاسبه ضخامت لایه مذاب به کار گرفته می‌شود. شرایط استفاده شده برای اعتبار سنجی ضخامت پوشش مربوط به شرایط مقاله الن و تو [۳] است. مذاب "روی" دارای چگالی $\rho_{\text{zinc}} = 6540 \text{ kg/m}^3$ و ویسکوزیته $\mu = 3 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ و دمای $T = 450\text{K}$ است. شکل (۱۱) تغییرات ضخامت بی بعد لایه مذاب را در طول ورق با این تحلیل دو بعدی در مقایسه با نتایج الن و تو [۳] نشان می‌دهد. محور افقی که مربوط به طول ورق است، که با d (اندازه دهانه خروجی جت) به صورت بدون بعد درآمده است. محل استقرار جتها $X=0$ است و قبل از آن لایه مذاب بسیار ضخیم و سیال در نزدیکی ورق در جهت حرکت ورق حرکت می‌کند و در دورتر از سطح، مذاب اضافی به حوضچه مذاب باز می‌گردد. پس از جتها ($X>0$) ضخامت

لایه به اندازه نهایی خود می‌رسد و بر روی ورق تثبیت و نهایتاً مذاب منجمد می‌شود.

۵- شبیه‌سازی سه بعدی فرایند پوشش‌دهی در مجتمع فولاد مبارکه

در خط تولید ورقهایی با ضخامت مختلف پوشش‌دهی می‌شوند. برای اینکه قبل از ورود به حوضچه مذاب، ورق فولادی به دمای مورد نظر برسد باید از کوره عبور کند. در خط تولید مجتمع فولاد مبارکه، با توجه به محدودیت گرمایی کوره هر چه ضخامت ورق بیشتر باشد باید سرعت ورق کاهش یابد. بسته به سفارش مشتری، ضخامت پوشش مورد نیاز نیز مرتباً تغییر می‌کند. فشار تغذیه جت (با سرعت جت خروجی)، دهانه خروجی جت، فاصله جت تا ورق و سرعت حرکت ورق تعیین کننده ضخامت پوشش فلز "روی" بر روی ورق فولادی هستند.



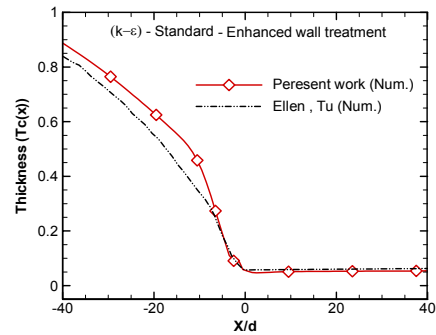
شکل ۱۲- قسمتی از نمای جانبی شبکه سه بعدی و شبکه روی بدنه جت

۱۷۵۰ متر) چگالی و فشار تعیین می‌شوند. در کار حاضر و در ادامه کلیه محاسبات مربوط به جریان هوا با شرایط محیطی $T=289K$ و $P=82200Pa$ و چگالی برابر 0.99 کیلوگرم بر متر مکعب انجام شده است. شبکه‌های مورد استفاده حدوداً دارای 1500000 حجم کنترل‌اند. شکل (۱۲) قسمتی از نمای جانبی شبکه سه بعدی در صفحه XY را نمایش می‌دهد. با توجه به اهمیت گام زمانی، چندین گام زمانی با مرتبه‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که گام زمانی مناسب $\Delta t = 0.00001$ s است. لازم به ذکر است که کیم و همکاران [۴] نیز معادله (۲۳) را برای محاسبه گام زمانی مناسب پیشنهاد کردند که نتیجه آن با Δt در نظر گرفته شده در شبیه سازی عددی کار حاضر مطابقت دارد.

$$\Delta t = 0.05H / V_{jet} \quad (23)$$

H فاصله میان دو جت از یکدیگر و V_{jet} سرعت هوای خروجی از جت است.

برخورد دو جت در ناحیه بعد از لبه‌های ورق (برخورد دو



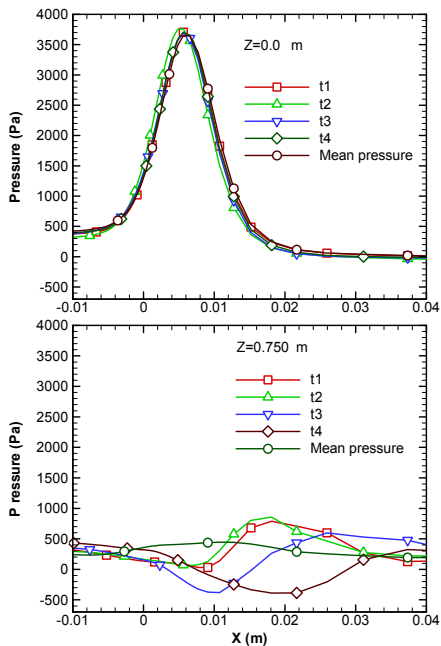
شکل ۱۱- تغییرات ضخامت بی بعد لایه مذاب را در طول ورق

افزایش سرعت خط به معنی افزایش انتقال مذاب و افزایش ضخامت است. کاهش فشار تغذیه جت نیز باعث کاهش نیروی بازگرداننده مذاب به داخل حوضچه و افزایش ضخامت می‌شود. از طرف دیگر کاهش فاصله جتها تا ورق باعث افزایش بازگشت مذاب و کاهش ضخامت می‌شود. اپراتور خط تولید با تنظیم پارامترهای فوق می‌تواند به ضخامت پوشش مورد نظر که پیوسته در انتهای خط اندازه‌گیری می‌شود دست یابد.

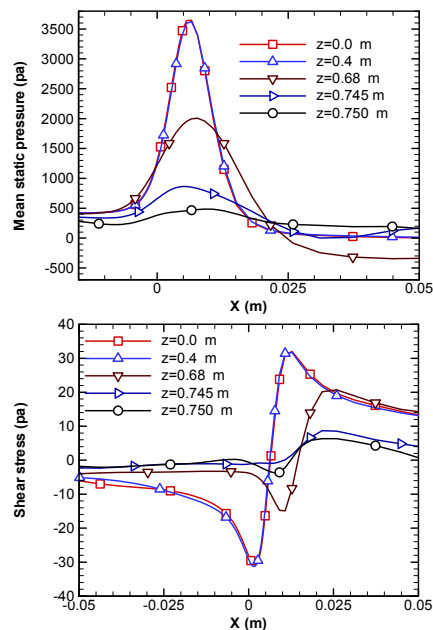
در این پژوهش، ابتدا جریان جت برخوردی به ورق در دو حالت به صورت سه بعدی شبیه سازی و با استفاده از نتایج، ضخامت پوشش ایجاد شده بر روی ورق محاسبه می‌شود. سپس تغییرات ضخامت پوشش در عرض ورق و علت آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. شرایط کاری مورد استفاده در شبیه سازی، از اتاق کنترل خط تولید ورق دریافت شده است.

۱-۵- حالت اول (ورق با ضخامت ۲ و عرض ۱۵۰۰ میلیمتر)

اولین مورد بررسی شده ورقی با ضخامت ۲ میلیمتر و عرض ۱۵۰۰ میلیمتر است. در حین کار فاصله جت تا ورق $40/1$ میلیمتر، فاصله محور جتها تا سطح مذاب ۷۵۲ میلیمتر، دهانه نازل جت‌ها ۱ میلیمتر بوده است. همچنین فشار تغذیه جت‌ها ۲۰ کیلو پاسکال و سرعت ورق 0.5 متر بر ثانیه بوده است. به علت تقارن نیمی از عرض ورق شبیه سازی می‌شود. با توجه به ارتفاع مجتمع فولاد مبارکه از سطح دریا (حدود



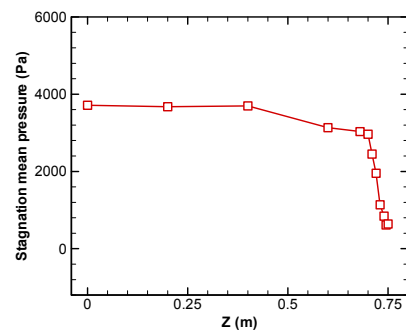
شکل ۱۴- توزیع فشار در طول ورق در زمانهای مختلف ، بالا: در مرکز ورق، پایین: در لبه ورق



شکل ۱۳- توزیع فشار و تنش برشی در موقعیتهای مختلف در عرض ورق در حالت اول

و لبه ورق نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان بیشترین فشار در لبه ورق نسبت به مرکز بسیار کمتر است. همچنین مشاهده می‌شود که توزیع فشار نسبت به زمان در لبه ورق مرتباً تغییر می‌کند. شکل (۱۴) توزیع فشار و تنش برشی را روی سطح ورق بر حسب طول و در موقعیتهای مختلف عرضی (از مرکز تا لبه ورق) نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نزدیکی لبه ($Z=0.75m$) فشار و تنش برشی ناشی از برخورد جت کاهش یافته است. شکل (۱۵) توزیع متوسط فشار سکون در موقعیتهای مختلف عرضی ورق در حالت اول را نشان می‌دهد. کاهش فشار سکون در نزدیکی لبه ورق نیز در این شکل کاملاً مشهود است.

شکل (۱۶) بردارهای سرعت را در صفحه YZ نشان می‌دهد. X در راستای طولی ورق، Z در جهت عرضی و جهت Y عمود بر ورق است. از $Z=0m$ تا $Z=0.75m$ ورق از مقابل جتها در حال عبور است اما بعد از $Z=0.75m$ تا $Z=1.011m$ نیز جریان هوای جتها در مقابل یکدیگر و به یکدیگر برخورد می‌کنند. اثرات نامنظم سه بعدی که در صفحات مختلف نشان



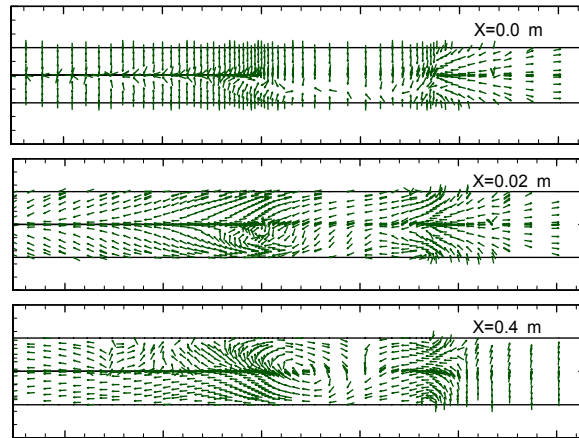
شکل ۱۵- توزیع فشار سکون میانگین در عرض ورق در حالت اول

جت هوا به یکدیگر بدون حضور ورق) باعث سه بعدی و نادائم شدن جریان می‌شود. این اثرات باعث سه بعدی و پررودیک شدن جریان هوا در نزدیکی لبه ورق نیز می‌شود. اثرات نامنظم سه بعدی در ناحیه نزدیک لبه ورق بسیار شدید است. این پدیده‌ها نیروهای موسوم به جت شویی یعنی گردابان فشار و تنش برشی که مذاب اضافی را باز می‌گرداند و لایه مذاب را بر روی سطح تثبیت می‌کند را تضعیف می‌کند. شکل (۱۳) توزیع فشار در طول ورق در زمانهای مختلف را در مرکز

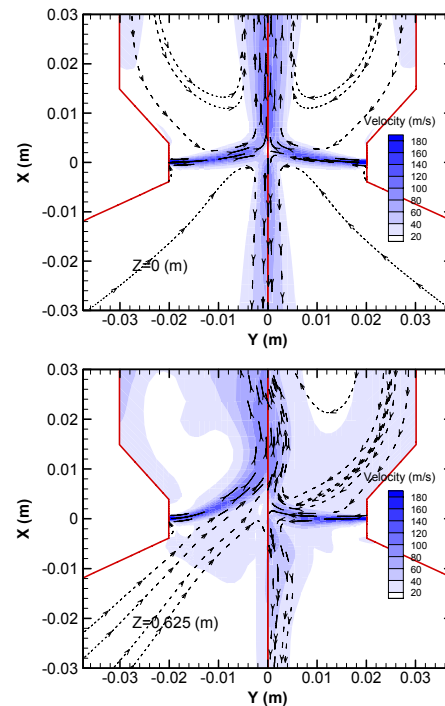
۵-۲- حالت دوم (ورق با ضخامت ۰/۹ و عرض ۱۲۵ میلی‌متر)

دومین مورد بررسی شده ورق با ضخامت ۰/۹ میلی‌متر و عرض ۱۲۵ میلی‌متر است. نتایج شبیه سازی جریان جت برخوردی به ورق، با شرایط هندسی و کاری که از اتاق کنترل خط تولید ورق مجتمع فولاد مبارکه دریافت گردیده ارائه می‌شود. با توجه به عوامل مختلف برای داشتن جرم پوشش در نظر گرفته شده (مطلوب)، شرایط کاری در زمان تولید ورق گالوانیزه در محدوده‌ای خاص توسط اپراتور تغییر می‌کند. مقادیری که در ادامه اشاره می‌شود، تقریبی از میانگین شرایط تولید است که در شبیه سازی عددی استفاده شده است. فاصله جت تا ورق ۲۰/۱ میلی‌متر، فاصله محور جتها تا سطح مذاب ۶۳۲ میلی‌متر، دهانه نازل جتها ۱ میلی‌متر، فشار تغذیه جتها ۲۰ کیلو پاسکال است. عرض ورق ۱۲۵ میلی‌متر که به دلیل تقارن نیمی از فاصله عرض ورق شبیه‌سازی می‌شود. ضخامت ورق فولادی ۰/۹ میلی‌متر و سرعت ورق ۰/۹۹۳ متر بر ثانیه است. شبکه مورد استفاده دارای تعداد ۷۵۰۰۰۰ حجم کنترل است. شکل (۱۷) خطوط جریان و کانتور سرعت جت هوای برخوردی به ورق را در مرکز ورق ($Z=0$) و در لبه ($Z=625\text{mm}$) در یک لحظه خاص نشان می‌دهند. تقارن جریان در مرکز ورق و عدم تقارن جریان در لبه آن در شکل (۱۷) به خوبی نشان داده شده‌اند. علت انحراف اندک جریان به سمت بالا، حرکت ورق به آن سمت، شرط مرزی دیواره جت در نزدیکی ورق متحرک و وجود سطح مذاب در سمت پایین میدان حل است. برخورد دو جت در ناحیه بعد از لبه‌ها (برخورد دو جت هوا به یکدیگر بدون حضور ورق) باعث نادانم و سه بعدی شدن جریان می‌شود. این اثرات نادانم در مرکز ورق تقریباً حذف می‌شوند.

شکل (۱۸) جریان نادانم دو جت برخوردی به یکدیگر را در فاصله ۲۵ میلی‌متر بعد از لبه ورق در چهار لحظه زمانی از یک پریود نوسان را نشان می‌دهد. این جریان پریودیک و نوسانی دو جت باعث نادانم شدن جریان برخوردی به ورق در نزدیکی لبه

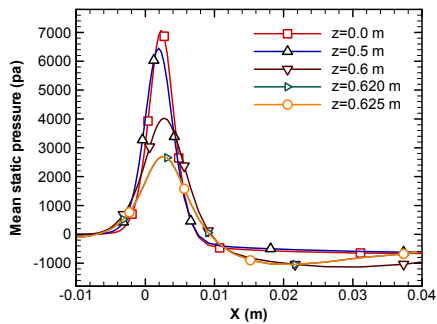


شکل ۱۶- بردارهای سرعت در صفحه YZ در حالت اول

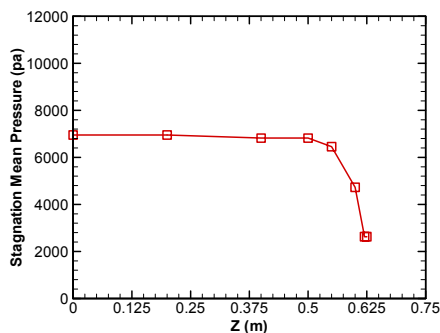


شکل ۱۷- خطوط جریان به همراه کانتور سرعت در مرکز و لبه ورق در حالت دوم در یک لحظه زمانی

داده شده است در ناحیه نزدیک لبه ورق بسیار شدید است. این اثرات نادانم در مرکز ورق تقریباً حذف می‌شوند. همچنین تشکیل گردابه سه بعدی در لبه ورق و به خصوص در صفحه $X=0.4\text{m}$ مشهود است که این پدیده نیز نیروهای جت شویی (فشار و تنش برشی) را تضعیف می‌کند.



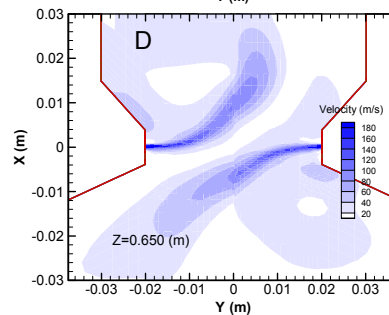
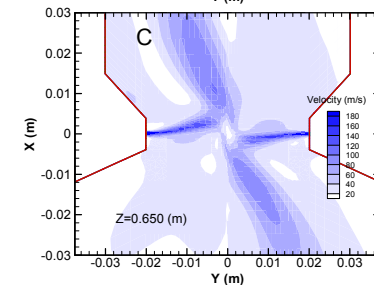
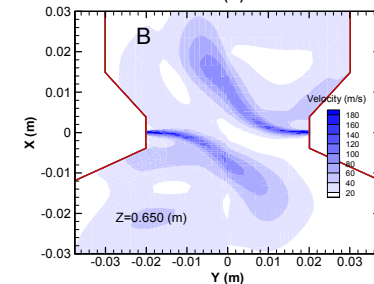
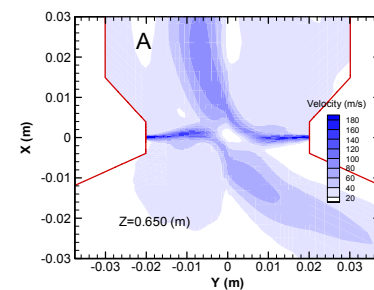
شکل ۱۹- توزیع فشار در طول ورق در موقعیتهای مختلف عرضی ورق در حالت دوم



شکل ۲۰- تغییرات فشار سکون روی سطح و در عرض ورق

عدم تقارن در شکل توزیع فشار و در دو طرف جت (نسبت به $X=0$) به علت عدم تقارن هندسی و شرایط مرزی است. شکل (۲۰) تغییرات فشار سکون را از مرکز تا لبه ورق نشان می‌دهد کاهش شدید فشار سکون ناشی از برخورد جتها بعد از لبه ورق به خوبی در شکل نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، تفاوت چندانی در توزیع فشار و تنش برشی روی سطح ورق در مرکز ($Z=0$) تا $Z=500\text{mm}$ دیده نمی‌شود. ولی با نزدیک شدن به لبه ورق اثرات سه بعدی باعث کاهش ماکزیمم فشار و تنش برشی شده است. توزیع فشار و و تنش برشی در راستای حرکت ورق (در راستای X) دو پارامتر اصلی تعیین کننده ضخامت پوشش فلز "روی" تثبیت شده در فرایند جت شویی است.

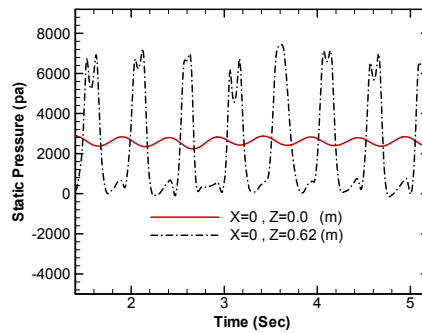
شکل (۲۱) تغییرات فشار استاتیکی را روی سطح ورق ($Y=0$) و در مقابل جتها ($X=0$) در دو نقطه در مرکز ($Z=0$) و در فاصله ۵ میلیمتری از لبه ورق ($Z=620\text{mm}$) بر حسب زمان



شکل ۱۸- کانتورهای سرعت ناش از برخورد دو جت در فاصله 25 mm بعد از لبه ورق در زمانهای مختلف در حالت دوم

ورق نیز می‌شود. با حرکت به سمت مرکز ورق اثرات نادائم و سه بعدی تضعیف و جریان تدریجاً مطابق شکل (۱۷) متقارن (برای $Z=0$) شده و نوسانات زمانی به شدت کاهش می‌یابد. شکل (۱۹) میانگین زمانی توزیع فشار را در راستای طولی ورق در فواصل مختلف از عرض ورق نشان می‌دهد. این شکل نیز کاهش فشار را با نزدیک شدن به لبه ورق نشان می‌دهد.

شکل (۲۳) کانتر سرعت و خطوط جریان در موقعیتهای مختلف عرضی ورق در حالت استفاده از تجهیز استوانه‌ای را نشان می‌دهد. این اشکال مربوط به موقعیتهای مختلف در جهت محور Z هاست. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از تجهیز استوانه‌ای شکل باعث ایجاد جریان منظم در لبه ورق می‌شود. تقارن نسبی خطوط جریان در نزدیکی لبه ورق بیانگر کاهش ناپایداریها به علت عدم برخورد جریان جتها بعد از لبه ورق است.



شکل ۲۱- تغییرات فشار روی سطح ورق در مقابل جتها بر حسب زمان در مرکز و نزدیکی لبه ورق

۶- شبیه سازی عددی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی ضخامت پوشش

اگر چه شبیه سازی جریان جت هوا سه بعدی است ولی شبیه سازی لایه مذاب به صورت دو بعدی انجام می‌شود. در هر موقعیت عرضی (Z) توزیع تنش برشی و فشار در راستای طول ورق (X) به کد آماده شده برای محاسبه ضخامت پوشش داده می‌شود. و توزیع ضخامت لایه مذاب در طول ورق و ضخامت نهایی پوشش تثبیت شده در همان موقعیت عرضی محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه در موقعیتهای مختلف عرضی این عمل انجام می‌شود، ضخامت لایه "روی" در عرض ورق به دست می‌آید.

انجام آزمایش برای بررسی اثر تجهیز استوانه در اضافه ضخامت پوشش لبه‌ها: برای اطمینان از نتایج عددی ضخامت پوشش، قطع‌هایی از هر کویل تولیدی در مجتمع فولاد مبارکه به آزمایشگاه، انتقال داده شد و ضخامت پوشش با دو روش اندازه‌گیری شده است.

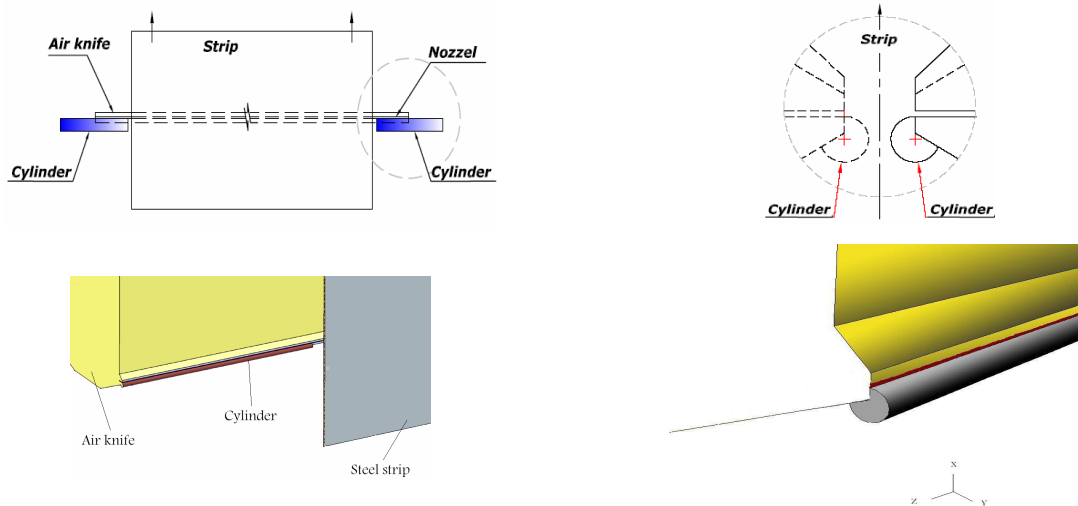
(۱) اندازه‌گیری با دستگاه ضخامت سنج: دستگاه اندازه‌گیری، شکل (۲۴)، ضخامت پوشش فلز "روی" را بر روی ورق گالوانیزه با واحد میکرومتر (μm) برای هر نقطه از ورق، مشخص می‌کند. باید توجه داشت که دستگاه ضخامت سنج پوشش، از دقت کمی برخوردار است ولی مزیت آن، توانایی اندازه‌گیری نقاط بیشتر به خصوص در لبه‌های ورق است.

(۲) اندازه‌گیری شیمیایی: در این روش با دستگاه قرصهای به قطر ۵ سانتی متر در موقعیتهای مختلف عرضی جدا شده و

نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که به علت انحراف جت به سمت بالا ماکزیمم فشار و یا فشار سکون در نقطه مقابل جتها ($X=0$) اتفاق نمی‌افتد، بنابراین فشار نشان داده شده در شکل معرف فشار سکون نیست. تغییرات شدید زمانی فشار در لبه و تغییرات کمتر آن در مرکز ورق به خوبی مشاهده می‌شود. تغییرات فشار نشان داده شده در مرکز ورق در شکل (۲۱) به علت نوسانات اندک محل نقطه سکون است ولی مقدار فشار سکون با زمان تغییر چندانی نمی‌کند.

۵-۳- شبیه سازی جریان جت برخوردی با تجهیز استوانه‌ای شکل برای ورق اول

تجهیز استوانه‌ای شکل، جسمی با سطح صاف در لبه جت است که باعث انحراف جریان هوای خروجی از جتها به سمت پایین و عدم برخورد جریان جتهای روبروی یکدیگر می‌شود. این ایده از مرجع شماره [۸] (که مربوط به یک خط تولید با ابعاد کوچکی است) اقتباس شده ولی در کار حاضر علاوه بر شبیه سازی عددی این تجهیز با شرایط کاری و هندسی (ابعاد بزرگ) متفاوت، به صورت تجربی نیز عملکرد این تجهیز آزمایش شده است. همان‌طور که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، تجهیز استوانه‌ای شکل در لبه پایینی جتها نصب و موقعیت عرضی نصب استوانه‌ها، منطقه خارج از ورق است. نتایج ارائه شده در این مقاله با تجهیز استوانه‌ای با قطر ۱۰ میلیمتر است.



شکل ۲۲- نحوه قرارگیری دو استوانه در دو طرف ورق و زیر لبه پایینی جتها

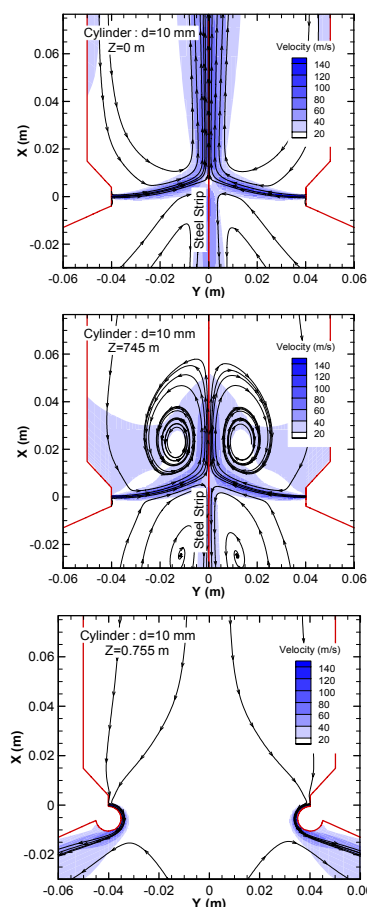


شکل ۲۴- دستگاه ضخامت سنج پوشش

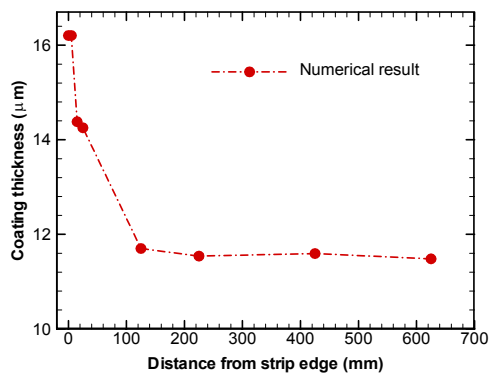
با توزین و سپس حل کردن پوشش در اسید و توزین مجدد وزن یا ضخامت پوشش محاسبه می‌شود. اندازه‌گیری شیمیایی به دلیل وسعت نمونه (قرصی به قطر ۵ سانتی متر) میانگین ضخامت را در قرص جدا شده ارائه می‌کند که مقدار آن به موقعیت عرضی مرکز قرص نسبت داده می‌شود. با این وجود به غیر نزدیک لبه ورق که تغییر ضخامت کم است اندازه‌گیری شیمیایی بسیار دقیق است.

۶-۱- نتایج عددی و آزمایشگاهی ضخامت پوشش با شرایط ورق حالت اول

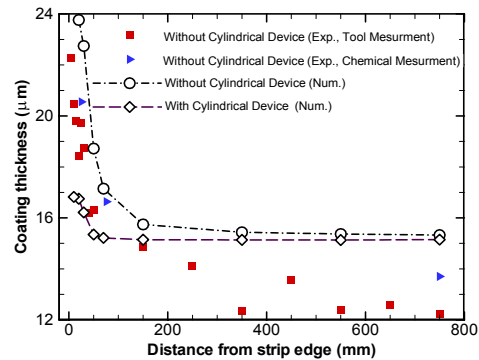
شکل (۲۵) تغییرات ضخامت پوشش در عرض ورق را در



شکل ۲۳- کانتور سرعت و خطوط جریان در موقعیتهای مختلف عرضی ورق در هنگام استفاده از تجهیز استوانه‌ای



شکل ۲۶- ضخامت پوشش ورق مربوط به حالت دوم



شکل ۲۵- ضخامت پوشش ورق مربوط به حالت اول بر حسب فاصله از لبه ورق

۲-۶- نتایج عددی ضخامت پوشش با شرایط ورق حالت دوم

شکل (۲۶) تغییرات ضخامت پوشش فلز "روی" را در عرض ورق با شرایط حالت دوم نشان می‌دهد. نتیجه محاسبه عددی ضخامت پوشش در شکل (۲۶) مشاهده می‌شود. ضخامت پوشش با شبیه سازی عددی مربوط به جتها و سپس لایه مذاب به دست آمده است. نتیجه عددی نشان می‌دهد که میزان اضافه ضخامت پوشش در لبه‌ها نسبت به مرکز ورق حدود ۴۰ درصد است. همان‌طور که با مقایسه با شکل (۲۶) ملاحظه می‌شود در حالت دوم (ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر و سرعت ۰/۹۹۳ متر بر ثانیه) نسبت به حالت اول (ورق با ضخامت ۲ میلی‌متر و سرعت ۰/۵ متر بر ثانیه) اضافه ضخامت کمتری در لبه‌ها مشاهده می‌شود. با توجه به اینکه سرعت نمونه ورق حالت اول کمتر از نصف ورق حالت دوم بوده است، بنابراین سرعت کمتر ورق باعث افزایش اضافه ضخامت پوشش می‌شود. این مسئله که با کاهش سرعت خط (یا در واقع سرعت ورق) مشکل اضافه ضخامت بیشتر است، توسط کارشناسان خط گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه نیز گزارش شده است. در خط تولید ورق گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه محدودیت ظرفیت کوره‌های گرم‌کن (که باید ورق را قبل از ورود به پاتیل مذاب تا دمای مشخصی گرم کنند) حداکثر سرعت خط را در ورقهای ضخیم محدود می‌کند. شکل (۲۶) صرفاً برای مقایسه اثر سرعت ورق بر روی اضافه ضخامت لبه‌ها آورده شده و برای حالت دوم ضخامت پوشش به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری نشد.

دو حالت اندازه‌گیری تجربی و حل عددی، با شرایط مربوط به ورق حالت اول نمایش می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، برای یک قطعه از ورق تولیدی در مجتمع فولاد مبارکه، در حالتی که از تجهیز استوانه‌ای استفاده نمی‌شود، تغییرات ضخامت پوشش در عرض ورق با دو روش آزمایشگاهی و همین‌طور به صورت عددی مقایسه شده‌اند. میزان اختلاف نتایج عددی برای ضخامت پوشش نسبت به اندازه‌گیری با ضخامت‌سنج، در مرکز ورق حدود ۲۲ درصد و میزان اختلاف نتایج عددی نسبت به اندازه‌گیری ضخامت پوشش به روش شیمیایی در مرکز ۱۱ درصد است. اندازه‌گیری شیمیایی به دلیل وسعت نمونه (قرصی به قطر ۵ سانتی متر) نمی‌تواند به خوبی در لبه ضخامت پوشش را که افزایش شدیدی دارد را گزارش دهد. ولی در مرکز ورق که تغییر ضخامت کمی را شاهدیم، اندازه‌گیری شیمیایی قابل اعتمادتر است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، مشکل اضافه ضخامت لبه‌ها بسیار شدید است.

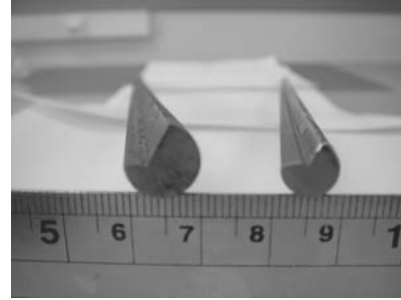
نتایج شبیه سازی عددی در حالتی که از تجهیز استوانه‌ای استفاده می‌شود نیز برای مقایسه در شکل (۲۵) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تجهیز استوانه‌ای اثر قابل توجهی در کاهش اضافه ضخامت داشته ولی آن را به طور کامل حذف نکرده است. با توجه به اینکه این ورق (حالت (۱)) قبل از ساخت تجهیز استوانه‌ای از خط تولید دریافت شد، نتایج آزمایشگاهی با تجهیز استوانه‌ای در دست نیست.

۶-۳- مقایسه آزمایشگاهی ضخامت پوشش با و بدون

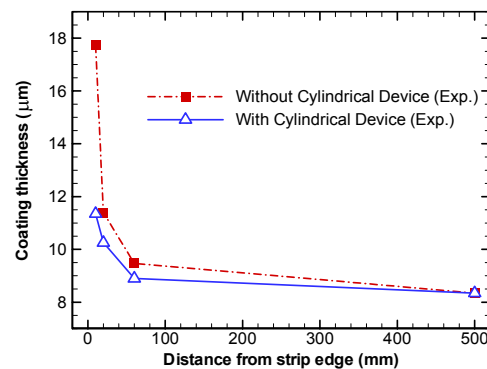
تجهیز استوانه‌ای

پس از شبیه سازی‌های عددی و مقایسه تغییرات ضخامت پوشش در عرض ورق با نتایج آزمایشی برای دو نمونه ورق، اثر تجهیز استوانه‌ای بر روی ضخامت پوشش لبه برای یکی از آنها شبیه سازی شد که به نتایج آن اشاره شد. پس از آن مرحله تجهیز استوانه‌ای ساخته و برای آزمایش به صورت موقت همان طوری که در شکل (۲۷) مشاهده می‌شود نصب و عملکرد آن در ضخامت پوشش مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه‌گیریها هم در حالتی که از هیچ تجهیز استفاده نمی‌شود و هم با تجهیز استوانه‌ای انجام گرفت. شکل (۲۷) نمای جانبی از محل قرار گیری یکی از استوانه‌ها در لبه زیرین جت را نشان می‌دهد. برای مقایسه تجهیز استوانه‌ای فقط در یکی از دو انتهای ورق نصب شد. در هنگام آزمایش ورقی به ضخامت ۲ میلی‌متر و به عرض یک متر با فشار تغذیه جت ۱۱ کیلو پاسکال و سرعت خط حدود ۵/۰ متر بر ثانیه در حال تولید بود. پس از تولید یک قطعه نمونه به آزمایشگاه انتقال و اندازه‌گیری توسط دستگاه ضخامت سنج پوشش انجام گرفت. در هر فاصله عرضی از لبه، اندازه‌گیری در چند موقعیت طولی و در پشت و روی ورق انجام و نتایج میانگیری شد.

شکل (۲۸) تغییرات ضخامت پوشش را در عرض ورق با و بدون تجهیز استوانه‌ای نشان می‌دهد. به طور متوسط ۳۷ درصد بهبود وضعیت اضافه ضخامت را در لبه نسبت به مرکز ورق شاهد هستیم. با استفاده از تجهیز ضخامت پوشش از ۸/۴ میکرومتر در مرکز ورق به ۱۱/۳ در ۱۰ میلی‌متری لبه ورق افزایش یافته، در صورتی که بدون تجهیز در ۱۰ میلی‌متری لبه ورق، ضخامت پوشش به ۱۷/۷ میکرومتر می‌رسد. همان طور که ملاحظه می‌شود استفاده از این تجهیز اثر فوق‌العاده‌ای در کاهش اضافه ضخامت در لبه ورق داشته است. این در حالی است که به دلیل آزمایشی بودن طرح در این مرحله، ساخت و نصب استوانه‌ها با وضعیتی دور از حالت ایدئال انجام شد و به خوبی بر لبه پایینی جت منطبق نشدند و در طول نیز دارای



شکل ۲۷- نمای جانبی استوانه‌ها با دو قطر متفاوت، نمایی از محل قرارگیری استوانه در لبه زیرین جت و نحوه بستن استوانه به لبه زیرین یکی از جتها



شکل ۲۸- میانگین ضخامت پوشش در دو طرف ورق با و بدون تجهیز

انحنای بودند. ارتعاش و "بو" (محدب) بودن ورق در عرض، از موارد دیگری بودند که آزمایش را از شرایط ایدئال دور کردند.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله به صورت عددی و آزمایشگاهی مشکل اضافه ضخامت پوشش فلز "روی" در فرایند تولید ورق گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه به روش غوطه وری داغ مورد بررسی قرار گرفت. شبیه سازیهای انجام گرفته نشان می دهد که برخورد دو توده جریان جت مقابل یکدیگر باعث کاهش فشار و تنش برشی در لبه های ورق گالوانیزه می شود. شبیه سازی عددی نشان می دهد که در نزدیکی لبه ورق تغییرات و نوسانات زمانی فشار افزایش می یابد. علاوه بر آن ماکزیمم فشار هوای جت بر روی ورق در لبه آن نسبت به مرکز ورق شدیداً کاهش می یابد. از دیگر اثرات ناپایب جریان، ایجاد اثرات سه بعدی در لبه های ورق است. این اثرات باعث تضعیف نیروهای جت شویی (شامل نیروی فشاری و تنش برشی که مذاب اضافی را باز می گردانند) می شود.

شبیه سازی عددی نشان می دهد که نصب یک تجهیز

استوانه ای شکل در لبه های خروجی جتها در ناحیه ای که جتها به یکدیگر برخورد می کنند، باعث هدایت جریان به سمت پایین شده و از برخورد دو جریان جت سیال در آن ناحیه جلوگیری می کند. استفاده از استوانه ها الگوی جریان را در لبه ورق منظم و توزیع فشار و تنش برشی در عرض ورق را یکنواخت می کند. شبیه سازی عددی نشان می دهد که این تجهیز نهایتاً باعث یکنواخت تر شدن پوشش و کاهش مشکل اضافه ضخامت فلز "روی" در نزدیکی لبه ورق می شود هر چند آن را به طور کامل حل نمی کند.

علاوه بر شبیه سازی عددی، تجهیز استوانه ای شکل در خط تولید گالوانیزه مجتمع فولاد مبارکه مورد آزمایش قرار گرفت و با وجود تمام مشکلات مربوط به نصب و اجرا، باعث بهبود مشکل اضافه ضخامت در لبه نسبت به مرکز ورق شد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از حمایت های دانشگاه صنعتی اصفهان و مجتمع فولاد مبارکه اصفهان از این کار تحقیقاتی تشکر می کنند.

واژه نامه

- | | | |
|-----------------------|--|----------------|
| 1. hot-dip coating | 9. sabb | 17. hybrid |
| 2. pre Heating | 10. star-cd | 18. simplec |
| 3. heating | 11. baffle | 19. grid study |
| 4. anealing | 12. fidap | |
| 5. zinc pot | 13. reynolds averaged navior
stockes eq. (RANS) | |
| 6. snout duct | 14. enhanced wall functions | |
| 7. thickness detector | 15. turbulence intensity | |
| 8. jet wipping | 16. quick | |

مراجع

1. Beltoas, S., "Oblique Impingement of Plane Turbulent Jets," *Journal of Hydraulic Div.*, Vol. 102, pp. 117-1192, 1976.
2. Lindgren, J., "Jet Stripping in Galvanization Process," Lulea University of Technology, Master of Science Program, 2001.
3. Ellen, C.H., and Tu, C.V., "An Analysis of Jet Stripping of Liquid Coatings," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 106, issue: 4, pp. 399-404, 1984.
4. Kim, Cho, and Ahn, and Chung, "Numerical Analysis of Edge Over-coating in Continuous Hot-dip Galvanizing," *ISIJ International*, Vol. 43, No. 10, pp. 1495-1501, 2003.
5. Podowski, K., "The Modeling of Liquid Films Along Inclined Surfaces," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 126, July 2004.

6. Naphade, P., Mukhopadhyay, A., and Chakrabarti, S., "Mathematical Modelling of Jet Finishing Process for Hot-dip Zinc Coating on Steel Strip," *ISIJ International*, Vol. 45, No. 2, pp. 209-213, 2005.
7. Jin, B., Acrivos A., and Munch A., "The Drag Out Problem in Film Coating," *Physics of Fluids*, 17 Oct. 2005.
8. Ahn, K. J., Chung M. K., "A Noble Gas Wiping System to Prevent the Edge Overcoating in Continuous Hot-dip Galvanising", *ISIJ International*, Vol. 46, No. 4, pp. 573-578, 2006.
9. Lacanette, D., Gosset, A., Vincent, S., Buchlin, J. M., and Arquis, E., "Macroscopic Analysis of Gas-Jet Wiping: Numerical Simulation and Experimental Approach," *physics of Fluids*, Vol. 18, April 2006.
10. Gosset, A., Buchlin J. M., "Jet Wiping in Hot-Dip Galvanization," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 129, pp.466-475, 2007.
11. Kweon, Y., Kim H. "Study on the Wiping Gas Jet in Continuous Galvanizing Line," *Journal of Thermal Science*, Vol. 20, No. 3, pp. 242-247, 2011.
12. Jones, W. P., and Launder B. E. "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 15, pp. 301-314, 1972.
13. Brolund B., Eriksson, L., "Temperatur model for Galvlinjen Omfattande Gryta Till Overkant Kylramp. Unpublished internal report": SSAB Tunnpilat, 2000.
14. Beltaos S., and Rajaratnam N., "Plane Turbulent Impinging jets," *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 11, No. 1, 1973.