

تحلیل برگشت فنری در فرآیند خمش هوایی از طریق آزمایش‌های مبتنی بر شبکه عصبی

چکیده

خم کردن صفحه فلزی یکی از پرکاربردترین فرآیندهای شکل‌دهی صفحات در صنایع تولیدی می‌باشد. در این مقاله پارامترهای خمیدگی و پدیده برگشت فنری صفحه فولادی زنگ‌نزن در فرآیند خمش هوایی بررسی شده است. در بسیاری کاربردها، برای محاسبه برگشت فنری یا از فرآیندهای سعی و خطا استفاده می‌شود، یا از روش‌های عددی. ثابت شده است که رویکرد شبکه عصبی (ANN) ابزاری مفید برای مهندسان می‌باشد. در این مطالعه برای پیش‌بینی مقادیر برگشت فنری صفحات فولادی زنگ‌نزن از آزمایش‌های مبتنی بر شبکه عصبی استفاده شده است. ابتدا فرایند خمش هوایی با استفاده از کد اجزای محدود متعارف مدل و تحلیل شده است. مقادیر برگشت فنری برای صفحات با ضخامت و زوایای خمش متفاوت محاسبه شده است. سپس به منظور انجام محاسبات مدل، آزمایش‌های فرآیند خمش هوایی انجام و به منظور هم‌خوانی شبکه عصبی با نتایج آزمایش‌ها، نتایج تجربی برای ارائه شبکه‌ای عصبی استفاده شدند. نتایج آزمایش‌ها برای اعتبارسنجی مدل اجزای محدود نیز استفاده شدند و نشان دادند که مدل با واقعیت هم‌خوانی خوبی دارد. در این پژوهش، مشاهده شد که شبکه عصبی می‌تواند به طور مؤثری برای تعیین برگشت فنری در فرآیند خمش هوایی استفاده شود و پتانسیل بالقوه‌ای برای تعیین پارامترهای فرآیند خمش هوایی در کاربردهای صنعتی مانند سوراخ‌کاری‌های ضربه‌ای دارد.

کلید واژه‌ها: روش اجزای محدود، شبکه عصبی، خمش هوایی

۱- مقدمه

محققین زیادی اثرات پدیده برگشت فنری را در فرآیندهای شکل‌دهی مختلف بررسی کرده‌اند. Panthi et al (۲۰۰۷) فرآیند خمش صفحه فلزی را با یک الگوریتم تغییر شکل بزرگ مبتنی بر کرنش الاستیک کلی و کرنش پلاستیک فرآیندها مدل کرد. آن‌ها اثر بار بر روی برگشت فنری را برای صفحه‌هایی با ضخامت‌ها و شعاع برش‌های مختلف بررسی کردند. Esat et al (۲۰۰۲) با استفاده از نرم افزارهای تحلیل اجزای محدود (FEA) تجاری موجود، مقدار برگشت فنری، کرنش پلاستیک معادل و توزیع تنش معادل Von Mises را برای مواد آلومینیومی مختلف با ضخامت‌های مختلف در عملیات خم کردن محاسبه کردند. آن‌ها نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود را با داده‌های تجربی محاسبه کردند.

خمش هوایی (Air bending) فرآیندی مشابه خمش برش V شکل می‌باشد، اما هندسه‌ی متفاوت برش سبب می‌شود که رفتار برگشت فنی متفاوتی حاصل شود. این تفاوت‌ها و رفتار برگشت فنی فلزات در خمش هوایی توسط محققین زیادی بررسی شده‌اند. (Fu et al (۲۰۱۱) با استفاده از تابع تسلیم نا همسانگرد (غیر ایزوتروپ) درجه دوم Hill به ترتیب تحت شرایط تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای مدلی اجزای محدود ارائه کردند. آن‌ها برای مدل کردن فرآیند خمش هوایی تک گامه، تابع تسلیم اصلاح شده Hill را در ABAQUS وارد کردند تا آزمایش‌های خمش هوایی چند گامه‌ی قطعات نیم بیضوی را برای صفحه‌های نا همسانگرد WELDOX۷۰۰، WELDOX۹۰۰ و OPTIM۹۶۰ بررسی کنند. آن‌ها برگشت فنی، کرنش در راستای ضخامت را در جهت عرضی و در مقاطع جزیی محاسبه کردند. (Wang et al (۲۰۰۸) با کنترل کردن جابجایی سوراخ کننده روش خمشی جدیدی برای دستیابی به زوایای خمشی دقیق‌تر ارائه دادند. آن‌ها ویژگی‌های قطعه را از اندازه‌گیری زوایای خمش بارگذاری شده و غیر بارگذاری شده تخمین زده و بر اساس این ویژگی‌های تخمین زده شده موقعیت نهایی سوراخ کننده را به گونه‌ای تعیین کردند که زاویه خمش مطلوب بعد از برگشت فنی حاصل شود. آن‌ها مجموعه‌ای از آزمایش‌ها را انجام دادند و نتایج آزمایش‌ها را با نتایج تحلیل اجزای محدود آن‌ها مقایسه کردند.

پیش‌بینی برگشت فنی با کمک شبکه عصبی (ANN) روشی رایج و بحث برانگیز می‌باشد. مطالعات تحقیقاتی بسیاری در این ارتباط انجام شده است. (Fu et al (۲۰۱۰) برای پیش‌بینی مسئله‌ی شعاع سوراخ تأثیر گذار بر بسیاری از پارامترهای شکل دهی خمش هوایی، یک الگوریتم شبکه عصبی ارائه کردند. برای کم کردن خطای بین شعاع سوراخ پیش‌بینی شده و شعاع سوراخ آزمایشگاهی، آن‌ها از یک الگوریتم ژنتیک (GA) استفاده کردند تا وزن‌های شبکه عصبی را بهینه نمایند. آن‌ها با شعاع‌های سوراخ پیش‌بینی شده و دیگر پارامترهای هندسی یک ابزار مدل اجزای محدود دو بعدی و سه بعدی ساختند. آن‌ها نشان دادند که طراحی سوراخ با مدل پیش‌بینی شبکه عصبی - الگوریتم ژنتیک ممکن می‌باشد. (Forcellese et al (۱۹۹۸) برای ارائه‌ی یک فرآیند خمش هوایی هوشمند، یک سیستم کنترل شبکه عصبی را بررسی کرد. آن‌ها به طور ویژه بر روی اندازه مجموعه‌ی لازم برای آموزش شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی عملکردها تمرکز کردند. آن‌ها صفحات آلومینیومی با ضخامت‌های مختلف را خم کردند تا بانک اطلاعاتی برای ساختن شبکه عصبی (آموزش آن) به دست بیاورند. آن‌ها مدل شبکه عصبی شان را برای پیش‌بینی نتایج خمش دیگر نمونه‌ها و مقایسه نتایج به کار بردند.

۲- شبکه عصبی ابتکاری

شبکه‌های عصبی ابتکاری (ANN) از عصب‌های ساختگی بهم متصلی ساخته شده‌اند که می‌توانند برخی ویژگی‌های بیولوژیکی عصبی را به اشتراک بگذارند. شبکه‌های عصبی مانند انسان‌ها یاد می‌گیرند. شبکه‌های عصبی این توانایی را دارند که رابطه‌ی ورودی-خروجی داده‌ها را در شیوه‌ای غیر خطی مدل کنند. شبکه‌های عصبی در محدوده‌ی گسترده‌ای از کاربردها شامل دسته‌بندی الگوها، شناسایی الگوها، بهینه‌سازی، پیش‌بینی و کنترل خودکار استفاده می‌شوند.

به طور کلی، شبکه عصبی چند لایه در سیستم‌ها استفاده می‌شود. یک شبکه‌ی عصبی چند لایه شامل لایه‌ی ورودی، لایه‌های مخفی و یک لایه خروجی می‌باشد. اولین لایه، لایه ورودی است که داده‌های ورودی را برای آموزش می‌پذیرد. لایه ورودی از تعدادی عصب معمولاً به تعداد ورودی‌ها تشکیل شده است. لایه‌های مخفی بین لایه ورودی و خروجی قرار دارند. لایه‌های مخفی داده‌ها را از لایه ورودی دریافت کرده، سپس داده‌ها را پردازش کرده و در آخر آن‌ها را به عنوان پاسخ به لایه خروجی می‌فرستند. لایه‌های مخفی از تعداد زیادی عصب محاسباتی تشکیل شده‌اند و توابع را تبدیل می‌کنند. لایه خروجی از تعدادی عصب محاسباتی تشکیل شده است. در این پژوهش، الگوریتم پس توزیع پیش خورنده چند لایه (multilayer feedforward backpropagation algorithms) به عنوان الگوریتم سیستم شبکه عصبی استفاده شد. تابع Log-Sigmoid برای تابع تبدیل استفاده شد، Levenberg-Marquardt به عنوان تابع آموزش انتخاب شد و روش میانگین مربع خطاها برای تابع عملکرد در سیستم استفاده شد.

۳- ارائه ANN برای خمش هوایی و نتایج

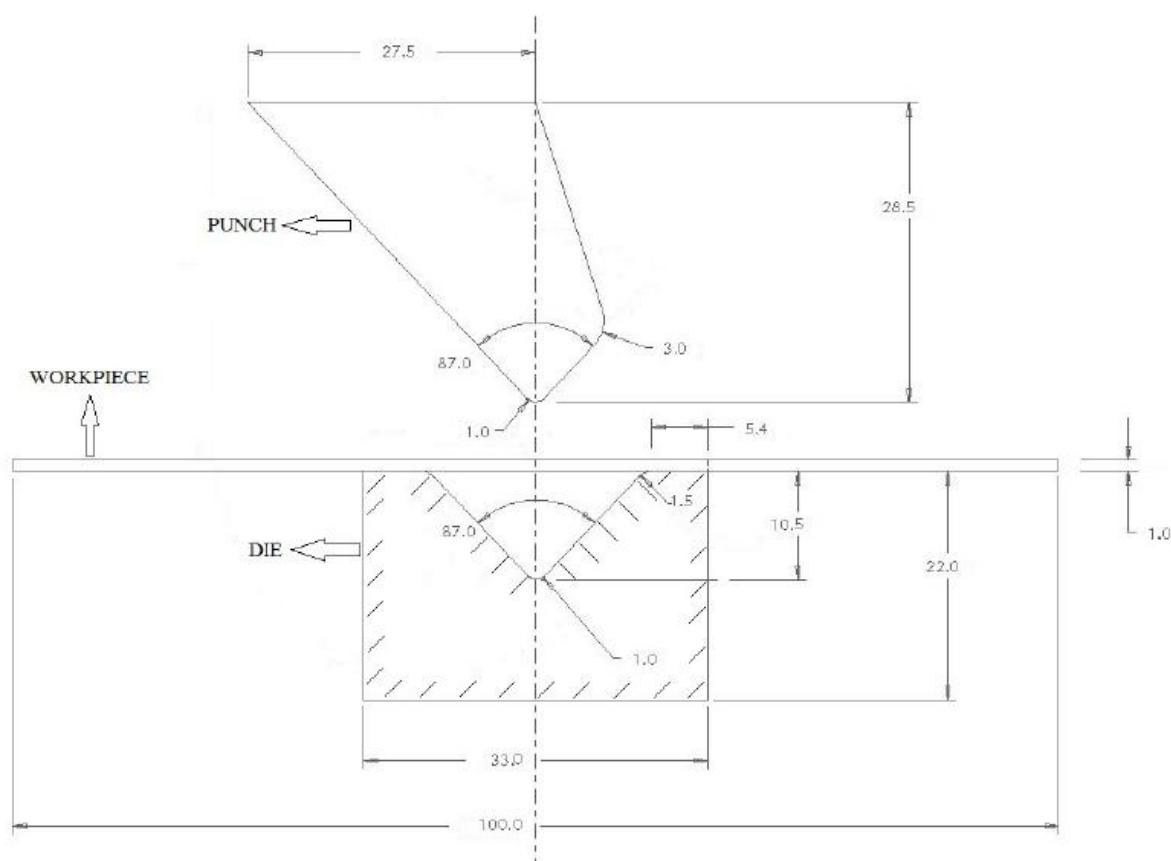
در این تحقیق، ابتدا، آزمایش‌های فرآیندهای خمش هوایی انجام شده و نتایج آزمایش‌ها با نتایج تحلیل اجزای محدود مقایسه شدند. در مرحله دوم، بر اساس نتایج تجربی شبکه عصبی توسعه داده شد. ANN بر اساس نتایج تجربی ساخته شد تا امکان ساختن شبکه عصبی بر اساس آزمایش‌ها بررسی شود. نتایج تجربی برای اعتبارسنجی تحلیل‌های اجزای محدود فرآیند نیز استفاده شدند.

۳-۱- FEA و آزمایش‌های خمش هوایی

در شبیه‌سازی‌های FE، عملیات خمش هوایی به عنوان مسائل کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته می‌شوند. اجزای کرنش صفحه‌ای چهار ضلعی چهار نقطه‌ای در نرم افزار MSC.Marc ۲۰۱۰ استفاده شدند. اصطکاک بین صفحه، سوراخ

کننده و برش با استفاده از قانون کولمب مدل شد و ضریب اصطکاک ۰/۰۵ در نظر گرفته شد. در این تحقیق، صفحات فولادی (SS ۳۰۴) قبل از شروع بارگذاری، خالی از هر گونه تنش پسماند فرض شدند. فرآیند لاگرانژ تصحیح شده به عنوان گزینه‌ای تحلیلی انتخاب شد، که در در تحلیل‌های جابجایی بزرگ و کرنش‌های بزرگ استفاده می‌شود.

در این مطالعه موردی، خمش هوایی برای هشت زاویه خمش مختلف و دو ضخامت مختلف مدل و شبیه‌سازی شد. ضخامت صفحات برابر ۱ و ۱/۵ میلیمتر بود. برای صفحه‌ی ۱ میلیمتری زوایای خمش برابر ۹۳/۶، ۱۰۱/۴، ۱۱۲/۳ و ۱۲۸ درجه انتخاب شد. برای صفحه ۱/۵ میلیمتری زوایای خمش برابر ۹۲/۳، ۱۱۸/۵، ۱۲۱ و ۱۳۴ درجه انتخاب گردید. ابعاد سوراخ‌کننده و شیار به کار رفته در خمش در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. صفحه فولادی در شیار قرار داده می‌شود و سوراخ‌کننده به طور قائم به سمت پایین به طرف صفحه حرکت می‌کند تا زمانی که زاویه مطلوب حاصل شود.



شکل ۱- نمای شماتیک از دستگاه آزمایش.

داده‌های تنش - کرنش پلاستیک واقعی با استفاده از آزمایش کشش به دست آمدند. تمامی صفحات فلزی دارای مدول الاستیسیته ۲۰۰ GPa، نسبت پواسون ۰/۳ و تنش تسلیم ۳۴۰ MPa می‌باشند. برای رفتار تغییر شکل الاستیک - پلاستیک، داده‌های کرنش سخت شدگی در جدول ۱ آورده شده‌اند. در آزمایش کشش ۱۸ نمونه آزمایش شدند و برای به دست آوردن نتایج دقیق، نتایج حاصله بهینه‌سازی شدند. نمونه‌ها دارای ابعاد ۱۰۰×۱۰۰ mm بودند. زوایای خمش صفحات در حالت کاملاً بارگذاری شده با کمک وسیله‌ی دیجیتالی اندازه‌گیری زاویه با حساسیت ۰/۱ درجه اندازه‌گیری شدند. تمامی قرائت‌های آزمایش‌ها سه بار انجام شد و خطای اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی در تمامی موارد کم‌تر از ۱٪ بود.

جدول ۱- داده‌های کرنش سخت شدگی

Plastic Strain (mm/mm)	True Stress (MPa)
0.0000	340
0.0513	410
0.0862	445
0.1040	467
0.1500	510
0.2000	550
0.2950	591
0.3560	610

در مطالعه موردی برای خمش هوایی صفحات فولادی ۱ mm، نتایج به دست آمده از FEA (تحلیل اجزای محدود) و آزمایش‌ها در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

جدول ۲- نتایج FEA و آزمایشگاهی برای فولاد ۱mm.

		Part Angle (°)		Springback (°)	
Thickness (mm)	Bend Angle (°)	FEA	Experiment	FEA	Experiment
1.0	93.6	102.4	103.4	4.4	4.9
1.0	101.4	108.8	109.8	3.7	4.2
1.0	112.3	118.3	119.3	3.0	3.5
1.0	128.0	133.0	133.2	2.5	2.6

جدول ۲ نشان می‌دهد، با افزایش زوایای خمش، مقادیر برگشت فنری کاهش می‌یابند. جدول ۲ نشان می‌دهد که نتایج مقادیر برگشت فنری برای خمش هوایی، نتایج مدل اجزای محدود (FEM) و نتایج آزمایشگاهی بهم نزدیک هستند و هم‌خوانی خوبی دارند. این نتایج این ایده را پشتیبانی می‌کنند که FEM می‌تواند به طور مؤثری برای شبیه‌سازی خمش استفاده شود. به شیوه‌ای مشابه، در مطالعه موردی صفحه فولادی ۱/۵ mm نتایج به دست آمده از FEA و آزمایش‌ها در جدول ۳ آورده شده‌اند.

جدول ۳- نتایج FEA و آزمایشگاهی برای فولاد ۱/۵ mm.

		Part Angle (°)		Springback (°)	
Thickness (mm)	Bend Angle (°)	FEA	Experiment	FEA	Experiment
1.5	92.3	98.1	98.6	2.9	3.2
1.5	118.5	122.5	123.1	2.0	2.3
1.5	121.0	124.8	125.4	1.9	2.2
1.5	134.0	137.4	137.8	1.7	1.9

از جدول ۳، مانند جدول ۲، چنین برداشت می‌شود که با افزایش زوایه خمش مقادیر برگشت فنری کاهش می‌یابد. جدول ۳ هم‌چنین نشان می‌دهد که نتایج مقادیر برگشت فنری برای خمش هوایی، نتایج FEM و نتایج تجربی بهم نزدیک هستند و هم‌خوانی خوبی با هم دارند. این نتایج نیز این اصل را اثبات می‌کنند که FEM به طور مؤثری می‌تواند عملیات خمش را شبیه‌سازی کند و بنابراین هر دوی نتایج FEA و آزمایشگاهی را می‌توان برای ساختن شبکه عصبی به کار برد.

۳-۲- ساخت یک شبکه عصبی بر اساس نتایج آزمایشگاهی خمش هوایی

به منظور پیش‌بینی مقادیر برگشت فنری با ANN برای عملیات خمش هوایی، بر اساس نتایج آزمایشگاهی یک ساختار شبکه عصبی ارائه شد. سه مجموعه داده آموزشی مختلف و سه مجموعه داده آزمایشی مختلف برای فرآیند خمش هوایی ایجاد گردید. مجموعه داده‌های آموزشی در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. مجموعه داده‌های آزمایشی ساخته شده در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.

جدول ۴- مجموعه داده‌های آموزش

First training data set			Second training data set			Third training data set		
Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)	Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)	Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)
1.0	93.6	4.9	1.0	93.6	4.9	1.0	93.6	4.9
1.0	112.3	3.5	1.0	101.4	4.2	1.0	112.3	3.5
1.0	128.0	2.6	1.0	128.0	2.6	1.0	128.0	2.6
1.5	92.3	3.2	1.5	92.3	3.2	1.5	92.3	3.2
1.5	121.0	2.2	1.5	118.5	2.3	1.5	118.5	2.3
1.5	134.0	1.9	1.5	134.0	1.9	1.5	121.0	2.2
						1.5	134.0	1.9

در هر سیستم شبکه عصبی برای فرآیند خمش هوایی برگشت فنری به دو پارامتر مستقل وابسته می‌باشد و این پارامترها ضخامت و زاویه خم می‌باشند. سیستم‌های شبکه عصبی ساخته شده این دو پارامتر مختلف را ترکیب کرده و سعی دارد برای به دست آوردن مقدار برگشت فنری نهایی یک الگوی کلی ارائه دهد.

جدول ۵- مجموعه داده‌های آزمایشی

First testing data set			Second testing data set			Third testing data set		
Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)	Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)	Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)
1.0	101.4	4.2	1.0	112.3	3.5	1.0	101.4	4.2
1.5	118.5	2.3	1.5	121.0	2.2			

برای بررسی قابلیت تکرار پذیری، دقت و توانایی سیستم‌های شبکه عصبی برای همان بانک اطلاعاتی، سه مجموعه آموزشی مختلف و سه مجموعه آزمایشی مختلف ایجاد و در بخش آموزش استفاده شدند. تعداد لایه‌های مخفی مختلف، درصدهای آموزشی و آزمایشی مختلف بررسی شد و نتایج به دست آمد. نتایج در جدول ۶ نشان داده شده‌اند.

جدول ۶- نتایج ANN

ANN results for the first system			ANN results for the second system			ANN results for the third system		
4 Hidden Layers			4 Hidden Layers			3 Hidden Layers		
Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)	Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)	Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Springback (°)
1.0	101.4	4.10	1.0	112.3	3.33	1.0	101.4	4.18
1.5	118.5	2.34	1.5	121.0	2.25			

نتایج به دست آمده از شبکه عصبی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند و همان گونه که در جدول ۷ نشان داده شده است، درصدهای خطای نسبی محاسبه شدند.

جدول ۷- خطاهای نسبی به صورت درصد

First System				
Springback (°)				
Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Experiment	NN (4 Hidden Layers)	Error (%)
1.0	101.4	4.20	4.10	2.38
1.5	118.5	2.30	2.34	1.74
Second System				
Springback (°)				
Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Experiment	NN (4 Hidden Layers)	Error (%)
1.0	112.3	3.50	3.33	4.86
1.5	121.0	2.20	2.25	2.27
Third System				
Springback (°)				
Thickness (mm)	Bend Angle (°)	Experiment	NN (3 Hidden Layers)	Error (%)
1.0	101.4	4.20	4.18	0.48

۴- بحث

جدول ۷ به طور واضح نشان می‌دهد که سیستم‌های شبکه عصبی ساخته شده با پارامترهای انتخابی به شدت قادرند مقادیر برگشت فنری را برای فرآیند خمش هوایی محاسبه نمایند. درصد خطا بین ۰/۴۸ و ۴/۸۶ می‌باشد. مشاهده می‌شود که اگر تعداد ورودی‌های آموزشی افزایش یابد (جدول ۵)، سیستم شبکه عصبی لایه‌های مخفی کم‌تری نیاز دارد و به سرعت همگرا می‌شود. با افزایش نسبت داده‌های آموزشی به داده‌های آزمایشی، دقت نتایج سیستم ANN افزایش می‌یابد، همان گونه که در جدول ۷ برای سیستم سوم نشان داده شده است.

از جدول ۷ چنین برداشت می‌شود که مجموعه‌های آموزشی مختلف با اندازه یکسان (سیستم‌های اول و دوم) می‌توانند برای مجموعه‌های آزمایشی مشابهی استفاده شوند و نتایج برگشت فنری به دست آمده نیز یکسان خواهد بود. درصد خطاهای این دو سیستم بهم نزدیک می‌باشد. این نتایج قابلیت تکرار پذیری و دقت سیستم‌های شبکه عصبی مختلف را برای داده‌های یکسان نشان می‌دهد.

جدول ۷ نشان می‌دهد که سیستم‌های شبکه عصبی ساخته شده عملی و مفید می‌باشند. هر سه سیستم شبکه عصبی برگشت فنی مدل‌های خمش هوایی را با مقادیر نزدیکی پیش‌بینی می‌کنند. جدول ۷ نشان می‌دهد که اگر تعداد پارامترهای مستقل در سیستم کاهش یابد، سیستم برای رسیدن به نتایج مطلوب به سرعت همگرا می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

هدف اولیه این پژوهش، استفاده از الگوریتم‌های شبکه عصبی مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی برای تعیین برگشت فنی و پیش‌بینی شکل نهایی صفحه فولادی در عملیات خمش هوایی می‌باشد. صفحه‌های فولادی با دو ضخامت مختلف ۱ و ۱/۵ میلیمتر در شبیه‌سازی‌های اجزای محدود استفاده شدند و سیستم شبکه عصبی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی فرآیند خمش هوایی ساخته شد. سیستم‌های شبکه عصبی ساخته شده با پارامترهای انتخابی توانایی زیادی در پیش‌بینی شکل‌های نهایی صفحه فولادی برای فرآیندهای خمش هوایی و محاسبه برگشت فنی بعد از آن دارند. سیستم‌های شبکه عصبی ساخته شده مقادیر برگشت فنی را به طور دقیق محاسبه می‌کنند. آزمایش‌های خمش هوایی نمایانگر این است که افزایش نسبت داده‌های ورودی آموزشی به داده‌های ورودی آزمایشی سبب می‌شود که دقت نتایج سیستم شبکه عصبی افزایش یابد. سیستم هم‌چنین نباید بیش آموزش دیده باشد. این پدیده را در حین ساخت شبکه عصبی می‌توان با محاسبه‌ی انحراف شبکه از طریق فرآیندهای سعی و خطایی بررسی کرد.

محاسبات پدیده برگشت فنی با استفاده از روش‌های عددی، فرآیندهای سعی و خطا یا با کمک جدول‌های از پیش تهیه شده کاری وقت گیر می‌باشد. در این مقاله ثابت شد که الگوریتم‌های شبکه عصبی ابزار مفیدی برای محاسبه‌ی سریع و دقیق مقادیر برگشت فنی خمش هوایی می‌باشند. علاوه بر این عملیات‌های خمش مختلف مانند خمش زاویه‌ای، لبه دار کردن و خمش U شکل را می‌توان با اجزای محدود و آزمایش تحلیل کرد و شبکه‌های عصبی مبتنی بر نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود و نتایج آزمایشگاهی را می‌توان برای تحلیل فرآیندهای خمش پیچیده متشکل از چندین ناحیه‌ی خمیده (صفحه کرکره‌ای) به کار برد.