بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
دانشکده مکانیک

# بررسی و شبیه سازی فرایند خم لوله های قطور با شعاع خم کوچک به روش خمش القائی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- ساخت و تولید

**فرشید احمدی**

استاد راهنما
**دکتر محمود فرزین**

۱۳۸۶

**دانشگاه صنعتی اصفهان**
دانشکده مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- ساخت و تولید آقای فرشید احمدی

تحت عنوان

# بررسی و شبیه سازی فرایند خم لوله های قطور با شعاع خم کوچک به روش خمش القائی

در تاریخ ۱۳۸۶/۱۰/۱۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای پایان نامه | دکتر محمود فرزین |
| ۲- استاد مشاور پایان نامه | دکتر محمدرضا فروزان |
| ۳- استاد داور | دکتر محمود سلیمی |
| ۴- استاد داور | دکتر حسن خادمی زاده |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر محمود اشرفی زاده |

# تشکر و قدردانی

خداوند سبحان را شکرمی گویم که به من توفیق داد تا این دوره را به پایان برسانم.

بعد از سپاس از خداوند متعال، از اولین اساتید زندگیم، پدر و مادر عزیزم که در تمام مراحل زندگی پشتیبان و یاور من بوده‌اند، تشکر و قدردانی می کنم.

از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمود فرزین که با رهنمودهای ارزشمندشان در طول پایان نامه همراه من بودند، تشکر و قدردانی می نمایم.

فرشید احمدی
دی ماه ۱۳۸۶
دانشگاه صنعتی اصفهان

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات, ابتکارات و
نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به
**دانشگاه صنعتی اصفهان** است.

تقدیم به

## پدر و مادر عزیز و مهربانم

آنان که راستی قامتم در شکستگی قامتشان تجلی یافت.

در برابر وجود گرامیشان زانوی ادب بر زمین می نهم و با دلی مملو از عشق و محبت بر دست پرمهرشان بوسه می زنم.

و تقدیم به

## ۳ خواهر عزیزم

آنان که حمایت های معنویشان همواره موجب دلگرمی و مایه رشد من بوده است.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ..... ۱

**فصل اول: مقدمه**

۱-۱- تاریخچه فرایند خمش القائی ..... ۲

۱-۲- خم لوله ..... ۳

۱-۲-۱- معیارهای پذیرش و عدم پذیرش یک خم ..... ۳

**فصل دوم: آشنایی با خم کاری به روش خمش القایی**

۲-۱- خمش القایی چیست ..... ۷

۲-۲- نحوه عملکرد خمش القایی ..... ۷

۲-۳- موارد استفاده از روش خمش القایی ..... ۹

۲-۴- قابلیت‌های روش خمش القایی ..... ۱٤

**فصل سوم: مقایسه خمش القایی با دیگر پروسه‌های جایگزین**

۳-۱- پروسه‌های جایگزین ..... ۱۵

۳-۱-۱- آشنایی با خمش سرد ..... ۱٦

۳-۱-۲- آشنایی با خمش القایی ..... ۲۱

۳-۱-۳- آشنایی با خمش تختال داغ ..... ۲۱

۳-۱-۴- آشنایی با روش زانوی جوشکاری شده ..... ۲۲

۳-۲- مقایسه خمش القایی بادیگر پروسه‌ها ..... ۲٤

۳-۲-۱- مقایسه خمش القایی با خمش سرد ..... ۲٤

۳-۲-۲- مقایسه خمش القایی با زانوی جوشکاری شده ..... ۳۰

**فصل چهارم: دستگاه خمش القایی و پارامترهای موثر فرایند**

۴-۱- دستگاه خم کاری به روش خمش القایی ..... ۳۵

۴-۱-۱- ساختمان دستگاه ..... ۳۷

۴-۱-۲- تکیه گاه یا بستر لوله ..... ۳۷

٤-۱-۳- هل دهنده ..... ۳۸

۴-۱-۴- سیستم گرمایش ..... ۳۹

٤-۱-۵- سیستم سرمایش ..... ٤٦

۴-۱-۶- بازوی خم ..... ۴۷

۴-۱-۷- سیستم کنترل ..... ٤۸

۴-۲- پارامترهای تولید ..... ٤۹

۴-۲-۱- مینیمم ضخامت دیواره لوله ..... ٤۹

٤-٢-٢- کمترین شعاع خم ..... ٥٣
٤-٢-٣- بیشترین دوپهنی بعد از خمش ..... ٦٠
٤-٢-٤- نازکی دیواره ..... ٦٢
٤-٢-٥- ضخیمی دیواره ..... ٦٣
٤-٣- قابلیت‌های خم کاری ..... ٦٤
٤-٤- کنترل ابعادی و تست‌های غیر مخرب مورد نیاز ..... ٦٦
٤-٥- معیارهای پذیرش ..... ٦٨
**فصل پنجم: تئوری فرایند خمش القائی**
٥-١- تجزیه و تحلیل بارگذاری درحین خم لوله ..... ٦٩
٥-٢- تحلیل تنش و کرنش در منطقه تغییر شکل پلاستیکی در حین خم ..... ٧١
٥-٣- تئوری خم لوله با شعاع خم کوچک ..... ٧٦
٥-٤- تحلیل تنش و کرنش در حین باربرداری ..... ٧٧
٥-٥- بررسی میزان برگشت فنری ..... ٧٩
٥-٦- شبیه سازی عددی الگوهای جریان ..... ٨١
٥-٧- شبیه سازی عددی میدان تنش ..... ٨٤
**فصل ششم: تنظیمات لازم جهت شبیه سازی**
٦-١- مقدمه ..... ٨٦
٦-٢- دستاورد المان محدود برای تغییر شکل های پلاستیکی زیاد ..... ٨٦
٦-٣- تنظیمات ابعادی ..... ٨٧
٦-٤- ماده ..... ٨٨
٦-٥- تنظیمات بخش گرمایش القائی ..... ٩٠
٦-٦- دیگر تنظیمات لازم جهت شبیه سازی ..... ٩٤
**فصل هفتم: نتایج شبیه سازی و ارائه پیشنهادات**
٧-١- مقدمه ..... ٩٦
٧-٢- بررسی نازک شدن و ضخیم شدن ..... ٩٨
٧-٣- بررسی بیضی شدن سطح مقطع ..... ٩٩
٧-٤- نیروی هل دهنده ..... ١٠٢
٧-٥- تغییرات دما ..... ١٠٥
٧-٦- برگشت فنری ..... ١٠٤
٧-٧- اعتبار شبیه سازی ..... ١٠٦
٧-٧-١- بیضی شدن سطح مقطع و نازک شدن دیواره ..... ١٠٦
٧-٧-٢- برگشت فنری ..... ١٠٨

۷-۸- بررسی تغییرات فازی ..... ۱۱۰
۷-۹- جمع بندی..... ۱۱۱
۷-۱۰- ارائه پیشنهادات..... ۱۱۲
**مراجع** ..... ۱۱۴

## چکیده

اهمیت و ارزش نیروگاه‌های اتمی، نیروگاه‌های حرارتی و پالایشگاه‌ها که نبض تولید و انتقال انرژی را بر عهده دارند، بر هیچ کس پوشیده نیست. وجه مشترک آنها را می‌توان سیستم‌های لوله کشی و انتقال سیالات پر فشار دانست که نیروهای مهندسی فراوانی را برای طراحی و ساخت به خود اختصاص می‌دهد. یکی از حساس‌ترین نقاط سیستم لوله کشی، خم‌ها و زانوها است. این مسئله به خصوص درمورد لوله‌های با قطر بالا بسیار حادتر می‌باشد.

این پایان‌نامه به بررسی و شناخت روش خمش القایی برای خم لوله‌های با قطر بالا که کاربرد فراوانی در خطوط لوله، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه‌های اتمی دارد پرداخته است. با بررسی و مطالعه بر روی پروسه خم‌کاری به این روش و مقایسه آن با دیگر روش‌های خم‌کاری لوله و تولید زانو، مزایا و معایب آن، قابلیت‌ها و محدودیت‌های این روش می‌توان آن را یکی از روش‌های برتر برای خم لوله‌ها دانست.

برای آشنائی بیشتر از کیفیت لوله های خم شده به این روش و بهینه کردن و کنترل بیشتر برروی فرایند، یک تحلیل المان محدود بر روی این فرایند انجام گردید. جهت شبیه سازی این فرایند نیاز به داشتن توزیع حرارتی ناشی از سیستم گرمایش القائی و سرمایش بعد از آن می باشد. به این منظور از نرم افزار INFOLYTICA استفاده شده و توزیع حرارت بر روی لوله استخراج شده است. مدل ماده در نظر گرفته شده یک مدل الاستو- پلاستیک ترمو مکانیکی می باشد. گرمایش القائی موضعی، خم لوله های قطور با شعاع خم کوچک و خنک سازی سریع لوله بعد از فرایند خم دراین شبیه سازی به کمک نرم افزار ABAQUS انجام شده و نتایج شبیه سازی پارامترهای موثر از قبیل نازک شدگی جداره خارجی و ضخیم شدن دیواره داخلی لوله ، میزان نیروی هل دهنده مورد نیاز ، ovality سطح مقطع لوله و میزان زاویه برگشت فنری لوله در پایان خم استخراج شده است. تمام نتایج برای دوحالت با وجود اعمال ممان معکوس به بازوی خم و بدون وجود آن مقایسه شده و تصدیق شده است که برای جلوگیری از نازک شدگی بیش از اندازه دیواره خارجی لوله بایستی ممانی مناسب و معکوس به بازوی خم اعمال شود، تا با کنترل سرعت زاویه ای لوله و کم کردن آن نسبت به حالت سنتی کنترل بیشتری بر روی فرایند بوجود آید. جهت بدست آوردن میزان مناسب ممان معکوس و دیگر پارامترهای فرایند مانند نازک شدن جداره خارجی و میزان برگشت فنری لوله، یک بررسی تحلیلی نیز برای شرایط شکل گیری خم از قبیل تنش، کرنش، هندسه لوله و نیروها ارائه شده و در نهایت کلیه نتایج حاصل از المان محدود و تئوری با نتایج تجربی مقایسه گردیده که تطابق بسیار خوب بین آنها حاکی از صحت شبیه سازی انجام شده و تحلیل تئوری پیشنهاد شده می‌باشد.

از آنجائی که لوله در منطقه ای به دمای تقریباً ۱۰۰۰ درجه رسیده وسریعاً سرد می شود، خواص لوله از لحاظ ساختارهای دانه بندی و نوع آنها بسیار اهمیت پیدا می‌کند. لذا به کمک نرم افزار AC3 مناطقی از لوله که مارتنزیتی شده نیزمورد مطالعه قرار گرفته و مشخص گردیده است که این فرایند از لحاظ ویژگی های تردی و یا شکنندگی لوله بعد از فرایند خم اصلاً بحرانی نیست و این مورد نیز مانند بقیه موارد کیفیت و قابلیت بالای این فرایند را نشان می دهد.

## چکیده

اهمیت و ارزش نیروگاه‌های اتمی، نیروگاه‌های حرارتی و پالایشگاه‌ها که نبض تولید و انتقال انرژی را بر عهده دارند، بر هیچ کس پوشیده نیست. وجه مشترک آنها را می‌توان سیستم‌های لوله کشی و انتقال سیالات پر فشار دانست که نیروهای مهندسی فراوانی را برای طراحی و ساخت به خود اختصاص می‌دهد. یکی از حساس‌ترین نقاط سیستم لوله کشی، خم‌ها و زانوها است. این مسئله به خصوص درمورد لوله‌های با قطر بالا بسیار حادتر می‌باشد.

این پایان‌نامه به بررسی و شناخت روش خمش القایی برای خم لوله‌های با قطر بالا که کاربرد فراوانی در خطوط لوله، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌های حرارتی و نیروگاه‌های اتمی دارد پرداخته است. با بررسی و مطالعه بر روی پروسه خم‌کاری به این روش و مقایسه آن با دیگر روش‌های خم‌کاری لوله و تولید زانو، مزایا و معایب آن، قابلیت‌ها و محدودیت‌های این روش می‌توان آن را یکی از روش‌های برتر برای خم لوله‌ها دانست.

برای آشنائی بیشتر از کیفیت لوله های خم شده به این روش و بهینه کردن و کنترل بیشتر برروی فرایند، یک تحلیل المان محدود بر روی این فرایند انجام گردید. جهت شبیه سازی این فرایند نیاز به داشتن توزیع حرارتی ناشی از سیستم گرمایش القائی و سرمایش بعد از آن می باشد. به این منظور از نرم افزار INFOLYTICA استفاده شده و توزیع حرارت بر روی لوله استخراج شده است. مدل ماده در نظر گرفته شده یک مدل الاستو- پلاستیک ترمو مکانیکی می باشد. گرمایش القائی موضعی، خم لوله های قطور با شعاع خم کوچک و خنک سازی سریع لوله بعد از فرایند خم دراین شبیه سازی به کمک نرم افزار ABAQUS انجام شده و نتایج شبیه سازی پارامترهای موثر از قبیل نازک شدگی جداره خارجی و ضخیم شدن دیواره داخلی لوله ، میزان نیروی هل دهنده مورد نیاز ، ovality سطح مقطع لوله و میزان زاویه برگشت فنری لوله در پایان خم استخراج شده است. تمام نتایج برای دوحالت با وجود اعمال ممان معکوس به بازوی خم و بدون وجود آن مقایسه شده و تصدیق شده است که برای جلوگیری از نازک شدگی بیش از اندازه دیواره خارجی لوله بایستی ممانی مناسب و معکوس به بازوی خم اعمال شود، تا با کنترل سرعت زاویه ای لوله و کم کردن آن نسبت به حالت سنتی کنترل بیشتری بر روی فرایند بوجود آید. جهت بدست آوردن میزان مناسب ممان معکوس و دیگر پارامترهای فرایند مانند نازک شدن جداره خارجی و میزان برگشت فنری لوله، یک بررسی تحلیلی نیز برای شرایط شکل گیری خم از قبیل تنش، کرنش، هندسه لوله و نیروها ارائه شده و در نهایت کلیه نتایج حاصل از المان محدود و تئوری با نتایج تجربی مقایسه گردیده که تطابق بسیار خوب بین آنها حاکی از صحت شبیه سازی انجام شده و تحلیل تئوری پیشنهاد شده می‌باشد.

از آنجائی که لوله در منطقه ای به دمای تقریباً ۱۰۰۰ درجه رسیده وسریعاً سرد می شود، خواص لوله از لحاظ ساختارهای دانه بندی و نوع آنها بسیار اهمیت پیدا می‌کند. لذا به کمک نرم افزار AC3 مناطقی از لوله که مارتنزیتی شده نیزمورد مطالعه قرار گرفته و مشخص گردیده است که این فرایند از لحاظ ویژگی های تردی و یا شکنندگی لوله بعد از فرایند خم اصلاً بحرانی نیست و این مورد نیز مانند بقیه موارد کیفیت و قابلیت بالای این فرایند را نشان می دهد.

# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱- تاریخچه فرایند خمش القائی

فرایند خمش القائی، گونه ای از فرایند های خمش گرم می باشد که در سال ۱۹۶۱ توسط یک کمپانی ژاپنی به نام Dai-ichi High Frequency که عموماً بصورت مختصر DHF خوانده می شود اختراع گردید[۱]. در آن سال ها بخاطر مشکلات موجود درتجهیزات گرمایش القائی و هم چنین سیستم کنترلی آن کمتر این روش به چشم آمد[۲].

در سال ۱۹۷۰ شخصی به نام میرهوف[1] و پدرش شروع به بررسی تکنولوژی خم برای لوله های قطور کرده تا توانائی کمپانی خود ( Bend-Tec ) را گسترش دهند. این دو بعد از سفری به ژاپن و بازرسی از یک ماشین خمش القائی کوچک، مجذوب آن شده و تصمیم گرفتند تا ماشینی تولید کنند که از همان روش برای خم لوله های قطور استفاده شود. ابتدا در سال ۱۹۷۲ موفق شدند یک ماشین خمش القائی را طراحی و تولید و سریعاً وارد بازار کنند. با بررسی های بیشتر در مارچ ۱۹۷۳ موفق شدند اولین ماشین خمش القائی که قادر به خم لوله های به قطر ۲۷ اینچ بود را تولید کنند. سرانجام در آگوست ۱۹۷۵ ماشینی تولید کردند که خم لوله های با قطر ٦٦ اینچ را ممکن می-ساخت[۳].

به تدریج این فرایند شناخته شد بگونه ای که در سال ۱۹۸۰ کمپانی خم لوله Tusla نیز شروع ساخت چنین ماشین های خمشی در اروپا را آغازکرد[۴].

---

[1] Meierhoff

بررسی های زیادی جهت بالابردن کیفیت و استفاده بهینه از این روش از سال ۱۹۸۰ شروع شد. در سال ۱۹۸۰ شخصی به نام آسائو[1] از ژاپن آنالیزهای زیادی جهت بهینه استفاده کردن از این روش انجام داده و سرانجام موفق شد با پیشنهاد اعمال ممان معکوس، این فرایند را بهینه و کیفیت و قابلیت آن را دو چندان کند[۵].

در سال ۱۹۸٤ آقای وانگ[2] و دستیارش هو[3] ازچین بر روی تئوری این فرایند اندکی کارکرده و سعی کردند که با بررسی بر روی تئوری فرایند کمکی به بالابردن ظرفیت های نهفته این روش بکنند. آنها با انجام آزمایش‌های متنوع برروی لوله‌ها توسط یک ماشین خمش القائی 48B-1000KW دریک کمپانی درچین به نام Changzhou، تئوری ارائه شده خود را مورد بررسی دقیق تر قرار دادند[۶].

درسال ۱۹۹۸ یک کمپانی به نام INDUTECH در کانادا توانست یک ماشین خم القائی تولید کند که توانائی خم لوله های قطور با زاویه ۱۸۰ درجه را دارا بوده و می توانست استاندارهای مهندسی را نیز ارضاء کند[۷].

## ۱-۲- خم لوله

امروزه تنوعی از روش‌های خم لوله وجود داردکه پاره ای ازآنها همراه با گرما و پاره ای دیگر بدون حضور گرما انجام می‌شود. انتخاب یک روش نسبت به دیگری تابعی از ویژگی های ماده، اندازه لوله، شعاع خم، موارد اقتصادی و در دسترس بودن تجهیزات می‌باشد[۸].

به طور کلی در هر نوع فرایند خم لوله یک سری محدودیت هایی وجود دارد. به عنوان مثال موادی که قرار است خم شوند ترجیحاً بایستی خاصیت شکل پذیری[4] خوبی داشته و کمترین نرخ کرنش سختی را از خود نشان دهند. از این جهت در اکثر صنایعی که از لوله استفاده می‌کنند، از موادی برای لوله استفاده می‌شودکه این نیازها را برآورده کنند. یک خم موفق هم چنین تابعی از قطرلوله، ضخامت لوله و شعاع خم است. مثلاً هرچه نسبت قطر به ضخامت افزایش و شعاع خم نیز کاهش یابد، احتمال بیشتری برای کمانش[5] وجود دارد[۹].

هرفرایند خمش دارای توانائی های متفاوتی است. به منظور مقایسه این توانائی ها در فرایندهای مختلف و هم چنین شاخصی که بتواند کیفیت و قابل پذیرش بودن یک فرایند خمش را تعیین کند، نیاز به معیارهائی می باشد[۹].

### ۱-۲-۱- معیارهای پذیرش و عدم پذیرش یک خم

پارامترهایی وجود دارند که چگونگی آنها بعد از فرایند خم، پذیرش یا عدم پذیرش خم را مشخص می‌کنند. با بررسی این پارامترها برای هر نوع فرایند خمش، قابلیت های آن فرایند قابل استخراج می‌باشد.

#### میزان نازک شدن جدار خارجی لوله

در هرفرایند خمش، بخش بیرونی خم کشیده و بخش داخلی فشرده می شود. این عمل باعث نازک شدن سطح خارجی و ضخیم شدن سطح داخلی لوله می گردد.

به دلیل عدم قطعیت هائی که مربوط به روش تولید لوله، تولرانس های لوله و کلیه مواردی که مربوط به خود عملیات خمش می‌باشد بدست آوردن میزان دقیق درصد نازک شدگی جداره خارجی لوله امکان پذیر نیست. با این

---

[1] H.Asao. [2]Z.T.Wang [3]Z.Hu [4]ductility [5]buckling

حال آنچه که بصورت تقریبی در اکثر هندبوک های لوله ارائه شده، این میزان را توسط معادله ۱ پیش بینی می-کنند[۹].

$$thinning\,ratio = t\frac{R}{R+r}$$

$t$ = ضخامت لوله

$R$= شعاع خم

$r$= شعاع لوله(نصف قطر خارجی)

یک خم خوب ان است که ضخامت لوله در دیواره خارجی بعد از فرایند خمش حداقل برابر با می نیمم ضخامت مورد نظر برای یک لوله مستقیم باشد[۹].

**میزان بیضی شدن سطح مقطع خم**

معیار پذیرش ثانویه ovality می‌باشد. درطول فرایند خم، سطح مقطع قوس خم شکل بیضی به خود می گیرد که محور اصلی آن عمود برسطح خم است. میزان ovality را ازتقسیم کردن تفاوت میان قطر کوچک و بزرگ بیضی بر قطر اسمی لوله بدست می‌آورند[۹].

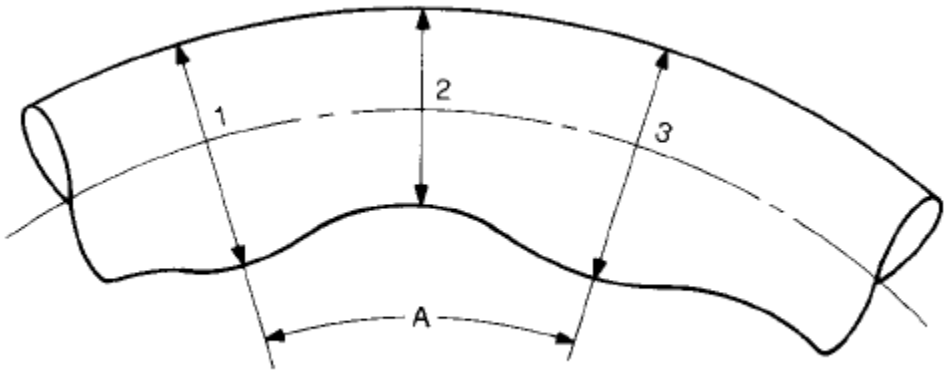
در مکان هایی که خم در معرض فشار داخلی است، فشار تلاش می‌کند تاسطح مقطع لوله را گردکند. تحت این شرایط بعضی کدهای استاندارد میزان ۸٪ را قابل قبول دانسته اند. اما در مواردی که موقعیت بخش خم شده بگونه ای است که در معرض فشار خارجی می‌باشد، از آنجائی که فشارخارجی تلاش می کند تا سطح مقطع لوله فروپاشی کند، حداکثر درصد قابل قبول برای میزان ovality را ۳٪ تعریف کرده اند. این دو مقدار برگرفته شده از استاندارد ASME B31.3 Code می‌باشد[۱۰].

**کمانش**

فرایند خم در مورد لوله هائی که نسبت قطر به ضخامت بزرگ دارند، اغلب به جای افزایش ضخامت داخلی لوله کمانش ایجاد می‌گردد. این شرایط حتی در مواقعی که از محورهای داخلی[1] یا دیگر وسائل جهت حداقل کردن آن استفاده شده، دیده شده است[۹].

استانداردی که عموماً مورد استفاده قرار می‌گیرد، توسط PFI[2] ارائه شده و در قالب معیار PFIES-24 می-باشد. تحت این معیار یک کمانش قابل قبول کمانشی است که نسبت فاصله میان دو قله تقسیم بر عمق قله میانگین نسبت به دره برابر یا بزرگتر از ۱۲ باشد. شکل و رابطه چگونگی این معیار را نشان می دهد[۱۰].

[1] Mandrel [2]Pipe Fabrication Institute




شکل ۱-۱:محدوده کمانش قابل قبول[۱۰]

عمق قله میانگین نسبت به دره توسط معادله حاصل می شود:

$$Depth = \frac{(OD)_1 + (OD)_3}{2} - (OD)_2 \qquad (۱-۱)$$

معیارکمانش قابل قبول بر طبق استاندارد PFIES-24 می‌شود :

$$\frac{A}{Depth} \geq \frac{12}{1}$$

با توجه وجود یا عدم وجود گرما در فرایند خمش، دو دسته عمده فرایند خمش سرد و فرایند خمش گرم وجود دارد. فرایندهای خمش سرد معمولا دارای محدودیت های هستند که توسط PFI این محدودیت ها ذکر شده و نمودارهائی ارائه شده است که دامنه استفاده از فرایندهای خمش سرد را نشان می‌دهد. پارامترهای موثر این نمودارها معمولاً R/D و D/t می باشند. به عبارتی در یکی از محورها شعاع نسبی خم و در محورد دیگری نسبت قطر به ضخامت قرار گرفته است[۱۰].

یکی از مواردی که خمش سرد جوابگوی استاندارد ها نمی باشد، خم لوله های قطور با شعاع خم کوچک است. از این رو برای خم چنین لوله هایی از خمش گرم استفاده می گردد. در خمش گرم معمولاً لوله هائی که قرار است خم شوند درمحدوده دمائی ۱۱۰۰-۸۵۰ درجه سانتی گراد برده شده و سپس عملیات خمش صورت می گیرد[۹].

روش خمش القایی[1] در خم لوله‌های با قطر بالا را می‌توان بهترین و برترین روش برای این منظور دانست که متأسفانه تکنولوژی و علم آن در کشور وجود ندارد و سالانه هزینه‌های بالایی برای وارد نمودن محصولات این روش که در صنایع مذکور مورد استفاده است، پرداخت می‌شود. هدف این پایان نامه بررسی و شناخت بر روی این روش و پارامترهای مؤثر در پروسه آن است تا شاید بتوان آن را به‌عنوان گام‌های اولیه برای بومی کردن این روش دانست.

[1] Induction Bending

البته کشورهای پیشرفته صنعتی سالیان دراز است که از این روش برای تولید محصولات مورد نیاز خود استفاده می‌کنند و با تحقیق و توسعه قابلیت‌های این روش به‌طور فزاینده‌ای افزایش داده‌اند تا بتوانند آن را روش برتر و بدون رقیبی کنند. به‌گونه‌ای که این روش قابلیت خم لوله‌های با قطر ٦٦ in و ضخامت ٥ in را دارد که هیچ روش خم کاری توانایی انجام چنین خمی را ندارد.

در فصل دوم روش خمش القایی معرفی و قابلیت‌های این روش ذکر شده است. در فصل سوم چکیده ای از دیگر روش های خمش لوله و یا رو ش های جایگزین خم ارائه شده و با ارائه ویژگی های هریک به مقایسه با فرایند خمش القائی پرداخته شده است. در فصل چهارم ابتدا دستگاه خمش القائی و اجزاء آن را مورد بررسی قرار گرفته وسپس در انتهای فصل، پارامترهای مهم یک فرایند خمش، در مورد این فرایند خاص بررسی شده است. در فصل پنجم یک تئوری تحلیلی از این فرایند ارائه گردیده و پارامترهای مهم آن به کمک فرمول های تئوری استخراج شده است. درفصل ششم تنظیمات لازم جهت شبیه سازی المان محدود این فرایند به طور مفصل توضیح داده شده است. درفصل هفتم نتایج حاصل از شبیه سازی ارائه گردیده و جهت اعتبار تحلیل المان محدود انجام شده، نتایج حاصل با نتایج تجربی موجود و با نتایج تئوری برگرفته از فصل پنجم مقایسه و خطای موجود محاسبه گردیده و در انتها یک جمع بندی کلی از نتایج انجام و پیشنهادات لازم جهت تحقیقات بیشتر ارائه گردیده است.

# فصل دوم

# آشنایی با خم کاری به روش خمش القایی

## ۲-۱- خمش القایی چیست

پروسه خم کاری به روش خمش القایی یک پروسه ترکیبی از هیدرولیک و گرمایش است تا بتوان یک فلز را خم نمود. پروسه گرمایش در این روش خم به روش القایی[1] صورت می‌گیرد از این رو آن را خمش القایی می‌نامند.

القا یک روش ساده و موثر برای گرمایش مواد فلزی است. در روش القایی به‌وسیله جریان‌های گردابی حاصل شده از یک میدان مغناطیسی متغیر القا شده، توسط جریان الکتریکی در داخل حلقه القایی[2] اطراف، باعث ایجاد یک منبع حرارتی داخلی در فلز شده و آنرا گرم می‌نماید. پروسه شکل دهی در این روش به‌وسیله یک سیستم هیدرولیکی انجام می‌شود[۸].

## ۲-۲- نحوه عملکرد خمش القایی

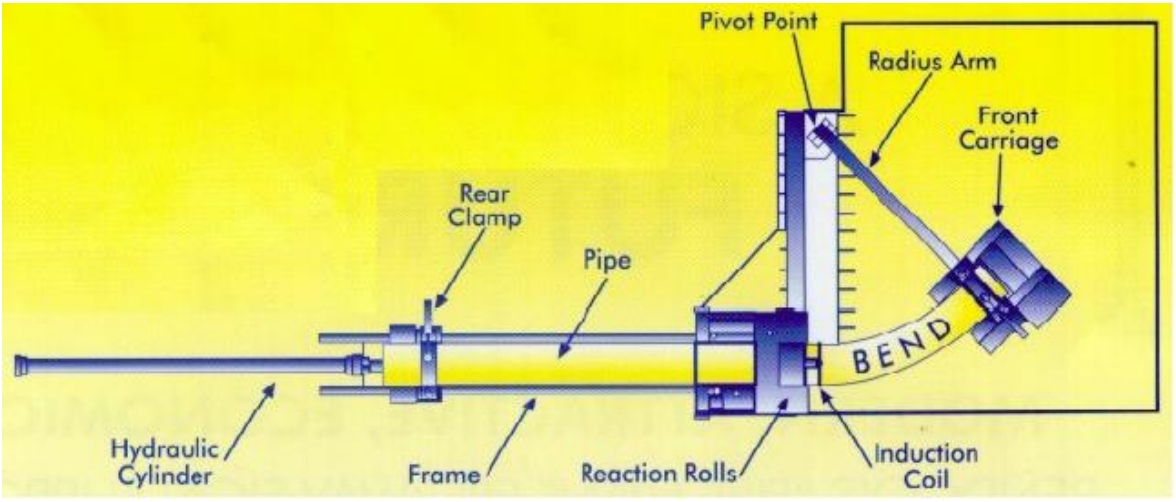
محصولی که باید خم شود از میان یک سیم‌پیچ القایی[3] به آرامی عبور می‌کند و به کمک منبع حرارتی داخلی ایجاد شده در لوله یک باند باریک محیطی از ماده گرم شده و به دمای شکل دهی[4] می‌رسد.

در شکل ۲-۱ یک نمای شماتیک از سیستم خم به روش خمش القایی ارائه شده است.

---

[1] Induction [2] Induction Ring [3] Induction Coil [4] Forging Temperature

بعد از سیستم گرمایش یک سیستم سرمایش وجود دارد. سیستم سرمایش یا همان حلقه‌های خنک کنندهٔ[1] تعبیه شده در مجاورت حلقه‌های گرمایش، ماده را بعد از عبور از سیستم گرمایش سرد می‌نماید. سیال عامل سیستم سرمایش، بسته به مورد استفاده آب یا هوا است. یک بازو[2] که بر یک محور استوار است و تنها قابلیت دوران حول این محور را دارد به‌وسیله یک سری تجهیزات، انتهای محصول را کاملاً گرفته است. بنابراین محصول به بازو کاملاً مقید است. فاصلهٔ قسمت انتهایی لوله تا محور بازو ثابت است و شعاع خم[3] محصول را نیز این فاصله یا طول بازو تعیین می‌کند. نکته قابل توجه این است که محور بازو در صفحه حلقه القایی قرار دارد[۸].




شکل ۲-۱: پروسه خم کاری لوله به روش خمش القایی[۸]

یک سیلندر هیدرولیکی لوله را به سمت جلو با یک سرعت مشخص هل می‌دهد. در این شرایط باند باریک محیطی گرم شده با همان سرعت تمام طول را که باید خم شود طی می‌نماید و در همین حال با توجه به‌این نکته که محور بازو در صفحه حلقه القایی قرار دارد، یک ممان خمشی نسبتاً بزرگ بر ضعیف ترین مقطع لوله که همان باند باریک گرم شده محیطی است اعمال می‌شود و شرایط را برای انجام یک خم یکنواخت و دارای شعاع خم ثابت که همان طول بازو است مهیا می‌کند. برای تغییر دادن شعاع خم می توان به سادگی محل محور را تغییر داد و طول بازوی شعاعی را تنظیم نمود.

از نکات قابل توجه در این روش خم این است که در حین پروسه خم ناحیه باریک گرم شده در هر دو طرف توسط ماده سرد پشتیبانی می‌شود. در یک طرف ماده توسط سیستم سرمایش سرد می‌شود و در طرف دیگر ماده از قبل در دمای محیط است، که این باعث می‌شود تا از دو پهنی و چین خوردگی در مقطع خم جلوگیری شود[۱۱]. شکل ۲-۲ تصویری واقعی از پروسه خم لوله به روش خمش القایی را نشان می‌دهد تا موجب آشنایی بیشتر با ابعاد و مشخصات این روش شود.

[1] Cooling Ring [2] Arm [3] Bend Radius

شکل ۲-۲ : پروسه خم لوله به روش خمش القایی[۱۲]

همانطورکه مشاهده می‌شود، این روش توانایی خم لوله‌هایی با قطر بالا را دارد. در ادامه با قابلیت‌های این روش بیشتر آشنا می‌شویم.

## ۲-۳ - موارد استفاده از روش خمش القایی

محصول روش خمش القایی قطعه خم شده با کیفیت و دقت بالا است. بنابراین هر جا که نیاز به یک قطعه خم شده باشد و از نظر فنی و اقتصادی تولید آن به روش خمش القایی قابل توجیح باشد می‌توان از این روش استفاده نمود[۱۳].

استفاده از روش خمش القایی تنها به خم لوله با قطر بالا محدود نمی‌شود. انواع سطح مقطع‌ها، تیوپ‌ها و مقاطع توخالی به‌صورت منحنی‌های تک شعاعی[1] یا چند شعاعی[2]، بیضی‌وار، سهمی‌وار مسطح و یا حتی فرم‌های سه بعدی را می توان با پروسه خمش القایی تولید نمود[۲].

شکل‌های ۲-۳ و۲- ٤ نشان دهندهٔ موارد استفاده از روش خمش القایی است.

شکل۲-۳: نمونه‌ای از محصول روش خمش القایی[۲]

[1] Single Radii [2] Multiple Radii