دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مکانیک

پروژه کارشناسی ارشد

بهینه سازی فنی اقتصادی مصرف سوخت در ایستگاه های افزایش فشار خطوط انتقال گاز طبیعی

استاد راهنما : آقای دکتر سپهر صنایع

دانشجو: رضا مولایی

بهار ۱۳۸۶

بهینه سازی فنی اقتصادی مصرف سوخت در ایستگاه های افزایش فشار خطوط انتقال گاز طبیعی

چکیده

گاز طبیعی عبوری از خطوط انتقال، جهت فائق آمدن برافت فشار ناشی از اصطکاک و یا تبادل حرارتی با محیط پیرامونی، از ایستگاهای افزایش فشاری که عمدتا در فواصلی بیشتر از ۶۰ مایل نصب گردیده‌اند، عبور داده می‌شود. در این ایستگاه‌ها برای تولید گرادیان فشار و نگهداشتن جریان جرمی مورد نیاز در محل تحویل، از انواع کمپرسورها استفاده گردیده که درصد قابل توجهی، حدود۳-۵ درصد[۱] از گاز انتقالی صرف تامین نیروی رانشی لازم در آنها می‌گردد و ازآنجائیکه میزان انتقال گاز سالانه در کشورها میلیونها *MMSCFD* است از این رو ارائه یک مدل ریاضی دقیق جهت کمینه کردن سوخت مصرفی حتی به مقدار جزئی و یافتن متغیرهای تصمیم‌گیری مناسب، ضروری به نظر می‌رسد. در این پروژه، روابط جبری غیرخطی مورد نیاز جهت تحلیل جریان پایا، ایزوترمال، یک بعدی و تراکم پذیر درون لوله‌ها و همچنین معادلات مرتبط با عملکرد و گذردهی کمپرسور و در نهایت میزان سوخت مصرفی در مولد نیرو (توربین گازی)، مورد بررسی قرارگرفته است. به منظور پی‌گیری محاسبات، اطلاعات مرتبط با هر جزء سیستم انتقالی را در صفحات گسترده متعددی محاسبه نموده و پیوندها و حلقه‌های محاسباتی دینامیک مورد نیاز برای تعیین فاکتور تراکم‌پذیری و ویسکوزیته گاز همچنین ضریب اصطکاک و فشار خروجی از کمپرسور به تناسب قیود سیستم انتقالی را بر روی آن اعمال کرده‌ایم. در نهایت با استفاده از روش بهینه سازی آماری بر پایه الگوریتم ژنتیک و همچنین برنامه ریزی غیرخطی بر پایه *GRG2* میزان سوخت مصرفی در این واحد را کاهش می‌دهیم. برای سهولت دسترسی به نتایج و ورود اطلاعات مورد نیاز در محاسبات، نمایه‌ای محاوره ای، شکل(۳-۵) طراحی نموده‌ایم که ارتباط کاربر با اطلاعات پراکنده موجود در صفحات گسترده را در قالب نرم افزاری با کاربری آسان فراهم می‌نماید. مثال عددی طرح شده بیانگر آنست که نرم‌افزار مذکور، جهت شبیه‌سازی و بدست آوردن نقاط عملیاتی با کمترین میزان مصرف انرژی در ایستگاه افزایش فشار و خطوط انتقالی متصل به آن بسیار کار آمد و مفید است.

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحه**

فهرست علائم ..... ج

فصل اول ۱

مقدمه ۲

نگاهی به تاریخچه فعالیتهای انجام شده در شبیه سازی و بهینه سازی ایستگاههای افزایش فشار ۳

آشنایی با گاز طبیعی ۶

نحوه انتقال گاز طبیعی ۱۱

احداث خط لوله ۱۲

ایستگاه های افزایش فشار ۱۳

فصل دوم ۱۶

تجهیزات مورد استفاده در ایستگاه های افزایش فشار ۱۷

تجهیزات جداسازی و فیلترکردن گازطبیعی ۱۷

مبدلهای حرارتی هوای خنک یا Air cooling Heat Exchanger ۳۰

فیلتر هوای ورودی ۴۰

کمپرسورها ۴۷

کمپرسور گریز از مرکز ۴۷

کمپرسورهای محوری ۵۴

کمپرسورهای رفت و برگشتی ۵۷

کمپرسورهای پیچشی ۵۷

توربین ها ۵۸

توربین گازی و موتورهای پیستونی ۵۸

انواع موتورهای توربین گازی ۵۹

تحلیل چرخه پایه در موتورهای توربوشفت ۶۴

چرخه‌های توسعه یافته در توربوشفت ها ۶۷

سرعت بحرانی در توربین‌ها ۷۲

معرفی پارامترهای مرتبط با کارایی کمپرسور سانتریفوژ و توربین گازی (اندازه گیری میدانی) ۷۳

جریان درکمپرسور سانتریفوژ / ضریب جریان ۷۵

افت کمپرسور سانتریفوژ / ضریب افت ۷۶

بازده کمپرسور سانتریفوژ ۷۷

توان توربین گازی ۷۹

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحه**

توان جذبی کمپرسور سانتریفوژ (توان خروجی توربین گازی) ۷۹
بازده و نرخ حرارتی توربین گازی ۸۰
نرخ حرارتی خروجی از توربین گازی ۸۱
تعیین بازده در پکیج توربوکمپرسور ۸۱
تعیین نقطه Surge و Turndown ۸۲
پدیده Stall ۸۴
پدیده Chock ۸۵
شرایط همسانی ۸۵
فصل سوم ۸۸
هیدرولیک خط لوله گاز ۸۹
خصوصیات گاز ۸۹
فاکتور تراکم پذیری ۹۴
نحوه محاسبه فاکتور تراکم پذیری به روش Dranchuk Abou-Kasem ۹۶
فاکتور اصطکاکی ۹۹
نحوه محاسبه ضریب اصطکاک ۱۰۰
لوله های صیقلی ۱۰۱
لوله های زبر ۱۰۳
فرموله کردن معادلات حاکم در شبیه‌سازی خط لوله ۱۰۷
معادلات حاکم ۱۰۹
استخراج روابط نرخ جریان و فشار ۱۱۴
روابط برای اتصال ترکیبی ۱۱۵
روابط برای اتصال انفصالی ۱۱۶
انشعابات ۱۱۸
محاسبه بازده در لوله ها ۱۱۹
فصل چهارم ۱۲۰
تکنیکهای بهینه سازی مورد استفاده در این پروژه ۱۲۰
بهینه‌سازی به روش گرادیان کاهشی GRG2 ..... ۱۲۱
روش گرادیان ۱۲۴
بهینه سازی به روش الگوریتم ژنتیک Genetic Algorithm ۱۲۴

فهرست مطالب

عنوان **شماره صفحه**

روشهای بهینه‌سازی مرسوم ۱۲۵
ژنتیک طبیعی و نظریه تکامل ۱۲۶
بررسی مقایسه ژنتیک طبیعی و آلگوریتم ژنتیک ۱۲۷
تفاوتها و مزایای الگوریتم ژنتیک ۱۲۸
مفاهیم اساسی الگوریتم ژنتیک ۱۳۰
کد کردن ۱۳۱
عملگرهای ژنتیک ۱۳۲
عملگرهای تقاطعی ۱۳۲
عملگرهای جهشی ۱۳۳
عملگر انتخاب ۱۳۴
استراتژی برخورد با محدودیتها ۱۳۷
محاسبه تابع برازش ۱۴۰
طبقه بندی تابع جریمه ۱۴۱
فصل پنجم ۱۴۴
بحث در مورد تولید و استفاده از صفحات گسترده در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ۱۴۵
بخش محاسباتی ۱۴۵
صفحه خطوط اصلی انتقال (ورودی/خروجی) ۱۴۶
خطوط فرعی انتقال به همراه اتصالات (ترکیبی/ انفصالی) ۱۴۷
صفحات کمپرسورهای سانتریفوژ ۱۴۸
صفحات توربینها ۱۴۸
صفحات مربوط به نقشه هد و راندمان کمپرسور ۱۴۹
روش حداقل مربعات (ماتریسی) ۱۴۹
صفحه بهینه سازی ۱۵۱
نمایه ورودی/خروجی و کنترل ۱۵۲
حل چند مثال بهینه سازی ۱۵۵
نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۶۸
منابع ۱۷۰
ضمایم ۱۷۳

فهرست علائم

فصل دوم (تجهیزات مورد استفاده در ایستگاه های افزایش فشار)	
C_1 ، C_2 : سرعت مطق ورودی هوا به روتور و خروجی هوا از روتور	T : گشتاور نیروی وارده از طرف روتور به سیال
V_1 ، V_2 : سرعت نسبی ورودی هوا به روتور و خروجی هوا از روتور	W : کار انجام شده
U_1 ، U_2 : سرعت محیطی(خطی) روتور در دهانه ورودی با شعاع متوسط R_1 و سرعت محیطی (خطی) روتور در دهانه خروجی با شعاع متوسط R_2	μ : ضریب لغزش
N : سرعت دورانی روتور	Z : تعداد پره‌ها
D_1 ، D_2 : قطرهای ورودی و خروجی	b_1 ، b_2 : پهنای پروانه
β_1 ، β_2 : زوایای پره	Q : نرخ جریان واقعی عبوری از کمپرسور سانتریفوژ
C : ضریب تخلیه برای جریان سنج اریفیس	d : قطر درونی جریان سنج اریفیس
Δp :اختلاف فشار اندازه‌گیری شده در صفحه اریفیس	φ :ضریب جریان کمپرسور
U_{tip} : سرعت گاز در لبه تیغه‌های پروانه	D_{tip} : قطر لبه تیغه‌های پروانه
H : افت واقعی	ψ : ضریب افت واقعی
H^* : افت آیزنتروپیک	ψ^* :ضریب افت آیزنتروپیک
H^P :افت پلی تروپیک	ψ^P :صریب افت پلی تروپیک
τ : گشتاور اندازه گیری شده از شفت توربین	P_c : توان جذبی کمپرسور سانتریفوژ
η_{GT} : بازده توربین	HR : نرخ حرارتی توربین گازی
η_C : بازده کمپرسور	EHR : نرخ حرارتی خروجی از توربین گازی
TD : بازگشت جریان در کمپرسور سانتریفوژ	SM : حاشیه $Surge$
فصل سوم (هیدرولیک خط لوله گاز)	
G : چگالی مخصوص گاز	Mw : وزن مولکولی گاز
q_G : نرخ جریان حجمی $\left[ft^3/sce\right]$	E_p : بازدهی لوله ها
q_{ac} : نرخ جریان حجمی در شرایط واقعی $\left[ft^3/sce\right]$	Re : عدد رینولدز
q_{sc} : نرخ جریان حجمی در شرایط استاندارد $\left[ft^3/sce\right]$	Z : ضریب تراکم
T_{sc} , P_{sc} , Z_{sc} : دما،فشارو فاکتور تراکم پذیری (شرایط استاندارد)	A_1..A_{11} , c_1..c_3 : ضرایب رابطه درنچاک- ابوکاظم
P_d , P_s : فشار مکش و تخلیه کمپرسور $\left[lbf/ft^2\right]$	T_r , P_r, ρ_r : دما ،فشار و چگالی کاهش یافته
R : ثابت جهانی گاز $\left[ft^2/\left(\sec^2 {}^\circ R\right)\right]$	T_c , P_c : دما و فشار بحرانی
f : ضریب اصطکاک	$Head$: هد کمپرسور
T : دما سیال انتقالی $^\circ R$	γ_g : چگالی مخصوص
k : نسبت گرمایی ویژه	η : بازده آدیاباتیک کمپرسور
L : طول لوله ها $\left[ft\right]$	η_{mech} : بازده مکانیکی کمپرسور
D : قطر لوله ها $\left[inch\right]$	ω : سرعت دورانی کمپرسور $\left[rev/\sec\right]$
η_D : بازده درایور (توربین)	A_h , B_h , C_h , A_e , B_e , C_e : ضرایب روابط بدون بعد کمپرسور
η_R : بازده اسمی درایور	SFC : مصرف سوخت ویژه $\left[scf/\sec\right]$
HV : ارزش حرارتی سوخت $\left[\left(ft.lbf\right)/\sec\right]$	PWR : توان مورد نیازکمپرسور $\left[\left(ft.lbf\right)/\sec\right]$
FC : سوخت مصرفی $\left[scf/\sec\right]$	$BPWR$: توان بازدارنده کمپرسور $\left[\left(ft.lbf\right)/\sec\right]$

$\dot{m}$: نرخ جریان جرمی سیال انتقالی $\left[lbm/\sec\right]$	Al : بارهای اضافی $\left[\left(ft.lbf\right)/\sec\right]$
c_p : اگرمای ویژه در فشار ثابت	ε : زبری نسبی
c_v : اگرمای ویژه درحجم ثابت	τ_0 : تنش برشی میان سیال و دیواره لوله
فصل چهارم (تکنیکهای بهینه سازی مورد استفاده دراین پروژه)	
x^* : نقطه پایا در فضای n بعدی	α_k : طول گام حرکت
d_k : جهت تغییر متغیر	f_k : مقدار برازندگی کروموزم
p_k : احتمال بقای کروموزم	q_k : مقدار تجمعی p_k
$f(x)$: تابع هدف	$p(x)$: تابع جریمه
فصل پنجم (معرفی نرم افزار شبیه‌سازی و بهینه‌سازی)	
A : ماتریس مولفه‌های طول نقاط نقشه کمپرسور	b' : ماتریس تک ستونی دربرگیرنده مولفه عرض
x : ماتریس ضرائب چندجمله‌ای	

فصل اول

مقدمه

نگاهی به تاریخچه فعالیتهای انجام شده در شبیه سازی و بهینه سازی ایستگاههای افزایش فشار

آشنایی با گاز طبیعی

نگاهی به تاریخچه گاز طبیعی

تولید گاز طبیعی

دوره انتقال از گاز مصنوعی به گاز طبیعی

نحوه انتقال گاز طبیعی

احداث خط لوله

ایستگاه های افزایش فشار

مباحث مورد اشاره دراین فصل، جهت بررسی تاریخچه و سیر تحول مطالعات صورت گرفته پیرامون بخشهای مختلف این پایان نامه، چگونگی پیدایش، نحوه تولید، انتقال و همچنین علت تجهیز خطوط انتقال گاز طبیعی به ایستگاه‌های افزاینده فشار می‌باشد.

+مقدمه

گاز طبیعی ، هیدروکربنی است که بطور طبیعی ساخته شده و بیشتر از متان تشکیل یافته‌است . این گاز معمولا در زیر زمین و در میان سنگهای متخلخل شکل گرفته و گاها به همراه نفت پیدا می‌شود. در طی فرایند تولید، چاه‌هایی در این نواحی حفر گردیده و از لوله‌هایی برای انتقال گاز به سطح استفاده می‌شود. خطوط گردآوری، محوطه تولید را به نقاط اتصال مرکزی وصل می‌کنند. برخی سیستمهای جمع‌آوری به تسهیلاتی برای خارج کردن ناخالصیهایی مانند مایعات، آب، دی اکسید کربن یا سولفور که باعث خوردگی لوله می‌شوند یا گازهای ساکنی مانند هلیوم که باعث کاهش مقدار انرژی گاز می‌شوند، مجهز شده‌اند. سیستم انتقال خط لوله ، بزرگراه عظیمی است که مقادیر زیادی از گاز طبیعی را ، از ناحیه تولید به محلهای مصرف انتقال می‌دهد. همانطور که می‌دانیم ، گاز طبیعی بواسطه اختلاف فشار از طریق شبکه خط لوله انتقال می‌یابد. فشار و انرژی گاز عبوری از شبکه بواسطه اصطکاک میان گاز و دیواره داخلی لوله و انتقال حرارت میان گاز و محیط ، افت پیدا می‌کند. برای غلبه بر این افت انرژی و کمک به تداوم حرکت گاز درون شبکه ، از ایستگاه‌های افزایش فشار (که در فواصل ۷۰ مایلی یا ۱۱۲,۶۵۴ کیلومتری نصب می‌شود) کمک می‌گیریم که البته در این ایستگاه‌ها قسمتی از گاز انتقالی در مولد نیرو مصرف گردیده که متعاقبا باعث ایجاد هزینه مصرفی می‌شود. ملاحظات اساسی در طراحی و کاربری شبکه خطوط لوله انتقال گاز ، بیشینه‌کردن عبوردهی و کمینه کردن هزینه سوخت مصرفی است.

با توسعه صنایع گازی ، شبکه‌های خطوط انتقال گاز در دهه‌های اخیر به سیستمهای پیچیده‌ای تبدیل شده‌اند. این شبکه‌ها ، امروزه در برگیرنده هزاران لوله ، صدها ایستگاه افزاینده فشار و تجهیزات بسیاری همانند سوپاپها و رگولاتورها می‌شود. در هر ایستگاه نیز گروه‌های متعددی از واحدهای کمپرسور با خروجی‌های

متنوع که برای اتساع ظرفیت خروجی سیستم بکار رفته ، نصب گردیده‌اند. چنین شبکه‌هایی ممکن است هزاران *MMSCFD* (میلیون فوت مکعب در روز) را انتقال دهند که چیزی در حدود ۵-۳ درصد این مقدار صرف ایجاد گرادیان فشار در ایستگاه‌های افزایش فشار برای تداوم حرکت گاز می‌گردد[۱]. ارزیابی شده که بهینه‌سازی کلیه عملکردها، امکان ذخیره‌سازی تا ۲۰ درصد از سوخت مصرفی درایستگاه‌ها را فراهم می‌کند.

نگاهی به تاریخچه فعالیتهای انجام شده در شبیه‌سازی و بهینه‌سازی ایستگاههای افزایش فشار

مدل سازی ریاضی یکی از کارآمد ترین ابزارهای مورد استفاده در طراحی، بررسی عملکرد و مطالعات بهینه سازی است [۲]. امروزه در صنعت شبیه‌سازی خطوط انتقال گاز، کاربران امکان بهره‌گیری از بسته‌های تحلیل آن لاین و ناپایای تشخیص نشتی، جریانهای چند فازی ، بهینه سازی، تضمین ایمنی جریان و غیره... را یافته‌اند [۳]، اما با وجود تمامی این گزینه‌ها استفاده از ابزارها و نگرش تحلیل پایا به جهت سادگی تحلیل و نزدیکی نتایج استخراجی با عملکردهای طولانی مدت، هنوز با استقبال گسترده‌ای مواجه است. بسیاری از محققین سعی بر یافتن راهی جهت بهینه‌سازی فرایند انتقال گاز با تمرکز بر روی عملکرد خطوط انتقالی و همچنین پیچیده ترین جزء سیستم انتقالی یعنی ایستگاه‌های افزایش فشار داشته‌اند.

- **دکترادگار**[۴] (۱۹۷۷) ، یک شبیه سازی کامپیوتری برای بهینه کردن و طراحی شبکه انتقال گاز ارائه کرد که تعدادی ایستگاه افزایش فشار ، به همراه قطر و طول بخشهای خط لوله و رژیم هر یک از این ایستگاه را مورد بررسی قرار می‌داد. این شبیه‌سازی به منظور کاهش هزینه‌های تولید و انتقال گاز در دانشگاه تگزاس انجام شد.
- **هنری هین** [۵] نیز در همان سال (۱۹۷۷) از ابزار ابداعی پایا برای تحلیل جریان ناپایا استفاده نمود.

- پنج سال بعد یعنی در سال (۱۹۸۲) ، **دان مک‌کلور** [۶]، در شرکت گاز طبیعی میشیگان ویسکانسین از روش برنامه ریزی خطی (*LP*)، برای تحلیل بهینه خط لوله استفاده کرد.
- در سال (۱۹۸۳) بار دیگر **پیژنگ ژو** [۷] از دانشگاه ایالت اکلاهاما از معادلات شرایط پایا برای محاسبه جریان ناپایا بهره گرفت.
- **پرینگل** ، **پرستون و مانتری** [۸] از شرکت نرم افزاری *InterComp*، در سال (۱۹۸۵)، مدلی برای بهینه سازی ناپایای سیستم انتقال گاز ارائه دادند.
- در همین سال ، برای نخستین بار **دیوید گلدبرگ** [۹] از دانشگاه آلباما از روش برنامه‌ریزی آماری بر پایه الگوریتم‌های ژنتیک ،جهت بهینه‌سازی عملکرد خط لوله استفاده کرد.
- **مایکل ریان و دکتر پیتر پرسل** [۱۰] در سال (۱۹۸۷)، بهینه‌سازی پایا در عملکرد شبکه انتقال گاز را مورد بررسی قراردادند.
- در سال (۱۹۸۹) **تونی ویلیامز و برودبنت** [۱۱] از مرکز کنترل خطوط انتقال گاز استرالیای جنوبی و همچنین **هوارد و مورفی** [۱۲] از شرکت انتقال گاز کلمبیا به ترتیب مطالعاتی موردی برای بهینه کردن عملکرد ایستگاهای افزایش فشار شهرهای مومبا و آدلاید ، همچنین مدلسازی برای عملکرد کمپرسورها جهت بالا بردن کارایی و کیفیت تصمیمات بهینه‌سازی ارائه کردند.
- طی سالهای (۱۹۹۱-۱۹۹۰) **فرد ادوم** [۱۳]و[۱۴] با همکاری دستیارش از شرکت سازنده توربینهای سولار دو ویرایش برای مدلسازی توربینهای گازی گرداننده کمپرسورهای سانتریفوژ ارائه کردند.
- در همین سال **دان شرودر**[۱۵] از شرکت استونر،تولید کننده یکی از مفیدترین نرم افزارهای شبیه-سازی خط لوله گاز طی سالهای اخیر، فرضهای ساده سازی حالت پایا را به تفصیل بیان نمود.

- در سال (۱۹۹۲) **باب مک‌چین** [۱۶] از شرکت گاز طبیعی پلین شمالی، قوانین فن را با استفاده از اطلاعات عملکردی و میدانی کمپرسور، برای تولید منحنی نقشه کمپرسور سانتریفوژ بکار گرفت.
- **فرانک لتنیوفسکی**[۱۷] درسال(۱۹۹۳) به مدلسازی ایستگاه‌افزایش‌فشار در شبکه‌انتقال گاز پرداخت.
- **ساموئل اندروس** [۱۸] درسال (۱۹۹۴)، برای نخستین بار از صفحات گسترده برای شبیه‌سازی شبکه های انتقال گاز پایا با فرض ثابت بودن فاکتور تراکم پذری برای تمامی سیستم انتقالی بهره گرفت.
- روش فوق باردیگر درسال (۱۹۹۹) توسط **یان کامرون**[۱۹] از ترانس کانادا برای تحلیل هر دوگونه جریان پایا و ناپایا در محیط نرم افزاراکسل انجام شد.
- **کرالیک و ژنیکک** [۲۰] (۱۹۹۵)، از گروه تحقیقاتی سیمونه در چکوسلواکی، کنترل بهینه عملکرد ایستگاه‌های افزایش فشار متداول در آن تاریخ را مورد بررسی قراردادند.
- **ریچارد کاتر**[۲۱] و[۲۲] از شرکت نرم‌افزاری *Stoner*، طی سالهای (**۱۹۹۸-۱۹۹۶**) برنامه‌ریزی در قالب یک متد ترکیبی غیرخطی- انتگرالی که بطور موثری توان محاسبه حلهای دقیق برای طبقه محدودی از مدلهای کمپرسور را داشت ، ارائه کرد و همچنین تلاشهای متعددی برای بهینه‌سازی ایستگاه در قالب شبیه‌سازی انجام داد.
- بید و دیگر همکارانش[۲۳](۱۹۹۷)، مسئله مینیمم کردن هزینه سوخت در شبکه‌های انتقال گاز پایا را با استفاده از مدلهای ریاضی در ایستگاه افزایش فشار مورد بررسی قرار دادند.
- **سومینگ وو** و سایر همکارانش [۱] از مرکز مطالعات انرژی هیوستون(۲۰۰۰)، دو مدل کاهشی ارائه کردند که اولی در قلمرو کمپرسور ودیگری برای تابع هزینه سوخت بود و همچنین طرح محدوده کمینه را ایجاد کردند که شواهد تجربی ارائه شده، موید سودمندی طرح مذکور بود.

- **سیون و جری مدیست** [۲۴] (۲۰۰۱) ، از شرکت بین المللی *Energy Solutions*، پدید آورنده یکی دیگر از نرم افزارهای پرکاربرد شبیه ساز و بهینه‌ساز خطوط انتقال گاز *Pipieline – Studio*، مدلهای ناپایا و موفقیت تحلیل پایا برای جریانهای ناپایا را مورد بررسی قراردادند.
- **اوهانیان و رینرکروز** از شرکت توربین‌سازی *Solar* [۲۵]و[۲۶] (۲۰۰۴-۲۰۰۳)،به مدلسازی توربو-ماشین‌ها در پکیج‌های شبیه‌سازی انتقال‌گازطبیعی و بررسی رفتار خروجی کمپرسورهاپرداختند.
- طی سالهای (۲۰۰۴-۱۹۹۵) **چاپمن و محمد عباس‌پور**[۲۷]و[۲۸]و[۲۹] از دانشگاه کانزاس، مقالات متعددی در زمینه بهینه‌سازی ایستگاه‌های افزایش فشار در شرایط غیر هم دما و ناپایا ارائه کرده‌اند.

با بهره‌گیری از مقالات مورد اشاره در بالا و تمرکز بر مباحث شبیه‌سازی ایستگاه به همراه خطوط لوله مجاور آن ، فیزیک توربوماشینهایی مانند توربین‌های گازی و کمپرسورهای سانتریفوژ، هیدرولیک خط لوله لنتقال گاز در شرایط پایا و ایزوترمال، بهینه‌سازی غیرخطی با استفاده از روشهای الگوریتم ژنتیک و گرادیان کاهیده تعمیم یافته و بویژه دانسته‌های موجود در مقالات[۱۸] ، [۱۹] که به استفاده از صفحات گسترده‌ای مانند محیط نرم افزاری *Excel* پرداخته، پروژه مذکور ایجاد و تدوین گردیده است.

آشنایی با گاز طبیعی[۳۰]

گاز طبیعی عمدتا از متان (CH_4) یعنی ساده ترین نوع هیدروکربن ، و هیدروکربنهای سنگین‌تر و پیچیده تری چون اتان ، پروپان و بوتان تشکیل شده است، جدول(۱-۱). گاز معروفی که در منازل ، محلهای کسب و کار و بخشهای صنعتی استفاده می‌شود در اصل متان خالص است که گازی است بی رنگ و بو و با شعله‌ای کم رنگ و نسبتا روشن می‌سوزد (بویی که در حین استفاده از گاز طبیعی به مشام می رسد به آن افزوده شده است). گاز طبیعی تمیزسوزترین نوع سوخت فسیلی است زیرا عمدتا فقط بخار آب و دی اکسیدکربن تولید

می‌کند. متان هم یکی از مواد خام اصلی برای ساخت حلالها و دیگر مواد شیمیایی ارگانیک است. پروپان و بوتان نیز از گاز طبیعی استخراج و جداگانه به فروش می‌رسد. گاز نفتی مایع شده LPG که اصولا همان پروپان است ، معمولا به جای گاز طبیعی در نقاط روستایی فاقد خطوط لوله استفاده می‌شود.

Gas Analysis					
Component	Molecular Weight	Symbol	Case		
			Summer	Winter	Design
			mol %	*mol* %	*mol* %
Nitrogen	28.01	N_2	3.8128	3.8116	3.6536
Carbon Dioxide	44.01	CO_2	0.8477	0.8484	1.0365
Hydrogen Sulphide	34.08	H_2S	0.0001	0.0001	0.0003
Methane	16.04	C_1	93.3370	93.3028	89.4775
Ethan	30.07	C_2	1.9410	1.9730	5.7001
Propane	44.10	C_3	0.0574	0.0601	0.1282
N-Butane	58.12	NC_4	0.0017	0.0017	0.0016
I-Butane	58.12	IC_4	0.0023	0.0023	0.0023

جدول(۱-۱): درصد مولی اجزاء تشکیل دهنده گاز طبیعی در جنوب ایران (عسلویه)

گاز طبیعی، غالبا ناخالصی‌هایی چون دی‌اکسید کربن (گازاسیدی) ، سولفید هیدروژن (گاز ترش)، آب و نیز نیتروژن ، هلیوم و سایر گازهای نادر را در خود دارد. با این وصف چون دی‌اکسید کربن را می‌توان به حوزه های نفتی قدیمی (تخلیه شده) تزریق نمود تا تولید آنها افزایش یابد ، آن را گاهی از گاز طبیعی گرفته و به عنوان فراورده گاز طبیعی می‌فروشند.

نگاهی به تاریخچه گاز طبیعی: گاز طبیعی تاریخی هزاران ساله دارد ، اما اهمیت آن به عنوان سوخت مورد استفاده در زندگی ما از اوایل دهه ۱۹۳۰ آغاز شده . در اواخر قرن بیستم مشخص شد که گاز طبیعی در بخش اعظم جهان صنعتی به یک منبع انرژی بسیار ضروری و حیاتی مبدل گردیده است. تقریبا در ۹۴۰ قبل از میلاد ، چینی‌ها با استفاده از نی‌های توخالی گاز طبیعی را از محل آن در خشکی به ساحل رسانده و از

آن برای جوشاندن آب اقیانوس و استحصال نمک استفاده می‌کردند. برخی از کارشناسان می گویند که چینی ها چاه های گاز را حتی تا عمق ۶۰۰ متری حفر می‌کردند. حفرچاههای گاز در ژاپن نیز در حدود ۶۰۰ قبل از میلاد گزارش شده است. سایر تمدنهای کهن نیز متوجه خروج گاز از زمین شده و دریافته بودند که قابل اشتعال است و می‌سوزد.

تولید گاز طبیعی : تقریبا تمام گازطبیعی از ذخایر زیرزمینی استحصال می‌شود و غالبا نیزبا نفت همراه است. گاز طبیعی و نفت خام میلیونها سال قبل در اثر تجزیه و فاسد شدن گیاهان و حیواناتی که مرده و اجسادشان به قسمتهای زیرین دریاچه ها و اقیانوسهای قدیمی رانده می شد ، به وجود آمد. بخش اعظم این مواد ارگانیک در هوا تجزیه (اکسیده) و وارد جو شد ، ولی بخشی از آنها قبل از تجزیه ، مدفون و یا وارد آبهای راکد و فاقد اکسیژن گردید و از اکسید شدن آنها ممانعت بعمل آمد. طی قرون و اعصار ، ماسه ، گل و سایر رسوبات برروی آنها ته نشین و آنرا بصورت سنگ فشرده در آورد. با انباشت هرچه بیشتر این لایه ها ، این مواد ارگانیک در سنگهای رسوبی حفظ شد. بالاخره، وزن لایه‌های انباشتی ایجاد چنان فشار و گرمایی نمود که مواد ارگانیک به گاز و نفت تبدیل شد. سنگهای دارای خاستگاه رسوبی از قبیل ذغال سنگ ، پلمه سنگها (*Shales*) و برخی از سنگهای آهکی رنگ تیره‌ای دارند که نشانگر وجود محتویات غنی ارگانیک آنهاست. بسیاری از بسترهای رسوبی نیز گاز خیز بوده و عمدتا از آنها گاز طبیعی تولید می‌شود. ذغال سنگ از مواد صرفا چوبی تشکیل شده که در اثر میزان حرارت و گذشت زمان به این شکل در آمده است. چوب و ذغال سنگ دارای خواص شیمیایی ویژه ای بوده و به همین جهت فقط گاز متان تولید می‌کنند. به همین دلیل است که معادن ذغال سنگ خطرناکند و قابل انفجار. معمولا برای دستیابی به گاز در رگه‌های ذغال سنگ که متان خالص است و در زمان تغییر یافتن چوب به ذغال سنگ به وجود می‌آید، چاههایی در ذخایر دربرگیرنده آن

حفر می‌کنند. این گاز از مسیر شکافهای طبیعی به سطح منتقل می‌شود، که در ابتدا آب تولید کرده و سپس متان آزاد می‌کند.

در دیگر ذخیره گاههای رسوبی ، مهمترین عامل تعیین کننده وجود گاز یا نفت، درجه حرارت است. در اعماق نسبتا کم ، که درجه حرارت برای تولید نفت کافی نیست ، فعل و انفعالات باکتریها نوعی گاز بیوژنیک (میکروبی) تولید می‌کند که متان تقریبا خالص است. این نوع گاز که معمولا به گاز باتلاقی مشهور است غالبا به مقدار زیاد وارد هوا می شود و بزرگترین حوزه گازی جهان یعنی حوزه یورگوی سیبری ، خاستگاه همین نوع گاز است. گاز موجود در آن، در زیر زمین دائما یخ زده محبوس است و حجم آن معادل ۸ تریلیون متر مکعب برآورد شده است.

در اعماق پایین تر و دمای بیشتر (بالای ۳۰۰ درجه فارنهایت یا ۱۵۰ درجه سانتی گراد) گاز ترموژنیک ایجاد می‌شود.این گازدر ذخایر زیرزمینی و غالبا در زیرسنگ‌پوش (*Cap – Rock*) نفوذپذیری که از خروج گاز به سمت بالا جلوگیری می‌کند، جمع می‌شود. در برخی از ذخایر، درجه حرارت زیاد،هیدروکربن‌های سنگین‌تر و مایع را به گاز تبدیل می‌نماید. پس از تولید گاز و کاهش درجه حرارت آن، این هیدروکربن ها دوباره به شکل مایع در آمده و میعان گازی بوجود می‌آید. مایع حاصله تقریبا بنزین خالص است و غالبا به آن بنزین طبیعی نیز می‌گویند . زمانی که مایع حاصله با بوتان ، پروپان و اتان همراه باشد، به این میعان، مایعات گاز طبیعی (*NGL*) می‌گویند. گاز مرطوب (*Wet*) تشکیل دهنده میعان، در ذخیره گاه‌ها و حتی در حین تولید بشکل گاز بوده و پس از رسیدن به سطح ، مایع گاز طبیعی را بدست می‌دهد. گاز "خشک" (*Dry*) متان خالص است و چه در درون ذخایر و چه در سطح زمین هیچ مایعی به دست نمی‌دهد. در درجه حرارت و اعماق بیشتر، یعنی عمق در بیش از ۵۵۰۰ متر ، و در فرایندی شبیه به شکست حرارتی

(*Thermal Cracking*) پالایشگاهی که طی آن مولکولهای بزرگ هیدروکربن شکسته و تجزیه می‌شوند، نفت خام به گاز طبیعی و گرافیت (کربن) تبدیل می‌گردد. در اعماق بیش از این ، فقط گاز ایجاد می‌شود و حفر اکثر چاهای عمیق برای دستیابی به گاز طبیعی صورت می پذیرد. در بسیاری از مواردی که حفاریهای عمیق در ذخایر ماسه سنگی گاز انجام می‌گیرد ، دانه‌های ماسه و شن از لایه کربن پوشیده شده است؛ یعنی نفتی که در چنین اعماق بسیار زیادی مدفون شده ، در اثر شکست حرارتی به گاز طبیعی مبدل شده است.

دوره انتقال از گاز مصنوعی به گاز طبیعی: در اوایل قرن هجدهم ، از چاههای آب یا فاضلاب حفاری شده غالبا به صورت اتفاقی گاز طبیعی خارج می شد. در اکثر موارد ، این گاز پدیده ای مزاحم تلقی می شد زیرا از مفید واقع شدن چاه حفر شده ممانعت بعمل می‌آورد. در سال ۱۸۲۱ در شهر فریدونیای ایالت نیویورک ، اسلحه سازی بنام ویلیام هارت اولین چاه گازی طبیعی امریکا را حفر کرد و بر روی آن بشکه بزرگی قرار داد .گاز این چاه کم عمق (با ۸,۲ متر عمق) بوسیله لوله های چوبی به منازل اطراف منتقل می‌شد. چند سال بعد به افتخار بازدید ژنرال لافایت ، از گاز طبیعی برای چراغانی کردن خیابانهای شهر مزبور استفاده بعمل آمد. در دهه های ۱۸۳۰ و ۱۸۴۰ چند چاه گاز دیگر در پنسیلوانیا ، نیویورک و بخش غربی ایالت ویرجینیا حفر شد که یکی از آنها ، چاه حفر شده در عمق ۳۰۰ متری بود که در نزدیکی چشمه سوزان جرج واشنگتن قرارداشت . فشار گاز طبیعی این چاه به قدری زیاد بود که یک ستون آب را تا ارتفاع ۵۰ متری بالا می‌برد. در این دوره، گاز طبیعی فقط در مکانهایی استفاده می‌شد که نزدیک به چاههای گاز قرارداشت، زیرا با استفاده از لوله‌های اولیه، انتقال گاز به نقاط دورتر امکانپذیر نبود. قبل از سال ۱۸۶۵ یعنی زمانی که نخستین شرکت گاز طبیعی در فریدونیا تاسیس گردید ، نفت نیز در نزدیکی شهر تیتوسویل پنسیلوانیا در نتیجه حفر یک حلقه چاه، کشف شده بود. در جریان هجومی که برای دستیابی به نفت براه افتاد، حفاران سعی می‌کردند

به گاز طبیعی برخورد نکنند. زیرا بدون استفاده از خط لوله، جمع‌آوری و استفاده از آن ممکن نبود، حال آنکه امکان حمل نفت به مراکز استفاده کننده وجود داشت. چاه‌های گاز مکشوفه در جریان جستجو برای نفت، هفته‌ها و گاه ماهها به حال خود رها می‌شد تا گاز آنها خارج و سپس نفت بیرون آید. گازی هم که همراه نفت بیرون می‌آمد معمولا سوزانده می‌شد. در ابتدا از گاز طبیعی در صنعت فولاد و آهن پنسیلوانیا، مخصوصا در منطقه پیتسبورگ استفاده می‌شد. چند شرکت برای حمل و انتقال گاز مصرفی کارخانه‌های ذوب آهن این ایالت تشکیل شد. در سال ۱۸۸۵ آندرو کارنگی متوجه شد که گاز طبیعی مورد استفاده در صنعت ذوب آهن ، روزانه جایگزین حدود ۱۰ هزار تن ذغال سنگ گردیده است. ولی این رونق و شکوفایی دیری نپایید، زیرا ذخایر محلی و شناخته شده گاز طبیعی به سرعت تخلیه و تمام شد. چندی قبل از سال ۱۹۰۰ بود که کارخانه های ذوب آهن پیتسبورگ مجددا به استفاده از ذغال سنگ رو آوردند. ظرف ۲۵ سال بعد، عرضه گاز طبیعی همین روند افت و خیز را دنبال نمود . استفاده نادرست و توام با اتلاف، موجب اتمام سریع حوزه های گاز اولیه شد و سوزانده شدن مقادیر بسیار زیادی از گاز در برخی از حوزه‌های نفتی تا اوایل دهه ۱۹۵۰ ادامه داشت.

نحوه انتقال گاز طبیعی

حمل گاز طبیعی از واحدهای تولیدی در هرحوزه تا شرکتهای توزیع کننده و برخی از مشتریان بزرگ صنعتی، بعهده صنعت خط لوله است. خط لوله انتقال گاز، از لوله‌های قوی و قطوری ساخته شده که قادرند فشار زیاد (۳۴۰۰ تا۶۹۰۰ $[kgf/cm^2]$) را تحمل نمایند. فشار گاز در حال انتقال در مسافتهای طولانی بوسیله ایستگاه‌های کمپرسوری که در نقاط خاص و راهبردی مسیر خط لوله نصب شده، تامین و حفظ می-گردد. موتورها و توربین‌های گازی نیز نیروی لازم برای کمپرسورهای خط لوله را تامین می‌کنند.

احداث خط لوله [۳۱]

در احداث خط لوله ، اولین گام عبارت است از پاکسازی مسیر عبور و حفر خندقی عمیق با استفاده از دستگاه حفاری. قطعات مختلف لوله و اتصالات در کناره مسیر خندق قرار داده می‌شود . قطر خط لوله طولانی مسافت بین ۲۴ تا ۴۸ اینچ (۶۱ تا ۱۲۲ سانتی متر) است ، ولی قطر برخی از لوله ها گاهی تا ۵۶ اینچ (۱۴۲سانتی متر) نیز می‌رسد. در حالی که ماشین آلات خاصی، لوله‌ها را در محل اتصال به یکدیگر نگه می‌دارند ، عملیات جوشکاری آنها اجرا می‌گردد. برای استفاده از خطوط لوله طولانی مسافت، ممکن است از ماشین آلات جوشکاری خودکار استفاده بعمل آید.

پس از جوشکاری ، دیواره بیرونی لوله تمیز شده، بعد از عایق کاری پوشانده می‌شود تا از فرسایش بیرونی ممانعت بعمل آید. در مواردی نیز، در کارخانه تولیدکننده، لوله با لایه‌ای از اپوکسی عایق‌بندی می‌شود و در محل احداث، فقط عایق‌بندی محلهای جوشکاری شده ضرورت پیدا می‌کند. برخی مواقع از تولیدکننده خواسته می‌شود که دیواره داخلی را نیز بالایه‌ای از اپوکسی بپوشاند. عایق بندی داخلی لوله چند مزیت دارد:

- مانع از فرسودگی یا خوردگی در حین حمل و نقل و نگهداری می‌شود.
- امکان انعکاس بهتر نور و بازبینی لوله را قبل جوشکاری فراهم می‌سازد.
- پس از انجام آزمایش هیدرواستاتیک ، از جذب شدن آب در بدنه لوله جلوگیری می‌کند.
- از جذب افزودنیهایی که به گاز بوی مشخص می‌دهند جلوگیری می‌کند.
- با ایجاد سطحی صاف و یکنواخت، کارایی جریان گاز را حدود ۴ تا ۵ درصد افزایش می‌دهد.

پس از جوشکاری چند قطعه لوله و تشکیل شدن یک رشته، آن را درون خندق قرار داده و روی آن را با خاک می‌پوشانند. چنانچه لازم باشد مسیر خط لوله از رودخانه ای بگذرد، رشته لوله‌ای را که به آن وزنه

هایی می‌آویزند تا شناور نشود، درون خندق حفر شده در بستر رود قرار می‌دهند یا اینکه پلی روی رود احداث و آن را از روی رود می‌گذرانند.

گاهی نیز از حفاری جهت دار یا انحرافی (مانند حفاری جهت دار در چاه های گاز) برای عبور از موانع عمده استفاده می‌شود. این نوع حفاری زمینه لازم را برای عبور خط لوله از زیر رودها ، بزرگراه ها و راه آهن بوجود می‌آورد. برای ممانعت از صدمه دیدن نقاط حساس از نظر زیست محیطی که به موانعی در مسیر احداث خط لوله تبدیل می‌شوند، این روش حفاری می‌تواند موثر واقع گردد. احداث خطوط انتقال به سبب سرمایه گذاری در امر حق بهره برداری از زمین ، واحدهای عظیم تقویت فشار و مقادیر بسیار زیاد لوله‌های فشار قوی و قطور ، بسیار پرهزینه است. به دلیل حجم سرمایه‌گذاری، شرکتهای گرداننده خطوط لوله تلاش می کنند تا در سراسر سال از حداکثر ظرفیت خطوط انتقال بهره برداری نمایند و هزینه‌های ثابت برگشت داده شود. صنعت خط لوله برای به حداقل رساندن هزینه‌های حمل و نقل ، تلاش می‌کند تا حتی الامکان نرخ یا میزان تحویل گاز را یکسان نگه دارد و به عبارت دیگر فاصله بین اوج تقاضا در زمستان و تابستان را به کمترین حد ممکن برساند. مثلا انگاره سازیهای رایانه‌ای به صنعت خـط لوله امکان می‌دهد که به جای ایجاد انباشت ظرفیت مازاد فروش نرفته در خط لوله، از گاز ذخیره شده به موقع استفاده بعمل آورد.

ایستگاه های افزایش فشار

فشار گاز طبیعی در مسیر انتقال تقویت می‌شود تا هزینه و اندازه لوله مورد نیاز برای انتقال آن به حداقل کاهش یابد. با جریان یافتن گاز در خط لوله، اصطکاک سبب کاهش نرخ فشار و جریان آن می‌گردد، لذا با استفاده از واحدهای تقویت فشار نصب شده در فواصل معین، باید فشارگاز در مسیرخط لوله تقویت شود.