



مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیر انتفاعی انرژی

مدلسازی کنترل دبی پمپ در فرآیندهای صنعتی به کمک شیر اختناق و درایور دور متغیر از منظر میزان مصرف انرژی

پایان نامه یا رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو

صادق ایمانی

استاد راهنما:

دکتر سید ایمان واصفی

اساتید مشاور:

دکتر حیدر مداح

شهریور ماه 1399

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب صادق ایمانی به شماره دانشجویی ۹۷۱۳۵۲۸۰۰۳ دانشجوی رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تشکر و قدردانی:

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق را هم ساخت تا این **پایان نامه** را به پایان برسانم. از استادان فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر سیدایمان واصفی به عنوان استاد راهنما و جناب آقای دکتر حیدر مداح به عنوان استاد مشاور که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

چکیده:

امروزه در کشورهای صنعتی الزامات زیست محیطی از یکسو و از سوی دیگر، مدیریت بهینه سازی انرژی بصورت یک امر غیر قابل اجتناب درآورده است. مجموعه اقداماتی که برای صرفه جویی انرژی در کارخانجات صورت می گیرد. شامل مواردی چون جایگزینی موتورهای الکتریکی با انواع موتورهای بازدهی بالا، استفاده از کنترل کننده های دور موتور در کاربردهایی که اتلاف انرژی در آنها زیاد است. جهت کنترل دبی سیال در فرآیندهای صنعتی روش های مختلفی از جمله بکارگیری شیر اختناق استفاده

می‌شود. بکارگیری شیر اختناق بصورت دائم سبب هدر رفت انرژی می‌شود. کاهش دور پمپ به کمک تکنولوژی VSD یک راه حل دائم و صرفه جهت کنترل و کاهش دبی سیال است. از مزایای بکارگیری درایور دور متغیر این است که زمانیکه به دبی 100٪ نیاز نداریم یا پمپ oversize است میتوان با کاهش دور پمپ هم در انرژی مصرفی پمپ صرفه جویی کرد و هم هزینه تعمیراتی پمپ را کاهش داد. نتایج مدلسازی برای درایور دور متحرک نشان داد با بکارگیری این روش میتوان به درصد صرفه جویی مصرف انرژی بین 31٪ تا 77٪ رسید. 31٪ برای زمانیکه هد استاتیک سیستم مانند سناریوی 7 تا 9 بزرگ (Hs=25 m) است. 77٪ صرفه جویی مربوط به زمانیکه هد استاتیک سیستم پایین مانند سناریوی 1 تا 3 کوچک (Hs=5 m) است.

فهرست مطالب

فصل 1: کلیات پژوهش	1
1-1- مقدمه	1
1-2- اهمیت و ضرورت تحقیق	1
1-3- اهداف و ضرورت تحقیق	2
1-3-2- مصرف انرژی در سیستم پمپاژ	2
1-3-3- روش‌های افزایش بهروری انرژی	5
1-4- هدف از پژوهش	6
1-5- سوالات تحقیق	6
1-6- بیان مساله	7
1-7- موتورهای مجهز به کنترل کننده دور موتور	7
1-7-1- مزایای استفاده از کنترل کننده های دور موتور:	8

9.....2-7-1- مدیریت بهینه سازی مصرف انرژی و نقش کنترل کننده های دور موتور

فصل 2: مروری بر مقالات

13

14.....2-1- مقدمه

14.....2-2- بررسی سیستم های فرکانس متغیر

15.....2-3- تحلیل و بررسی VFD روی پمپ

فصل 3: مبانی نظری

18

19.....3-1- مقدمه

19.....3-2- قوانین افینتی (تشابه) در کاربردهای پمپ و فن:

فصل 4: مدلسازی

24

25.....4-1- مقدمه

27.....4-2- تکنولوژی VSD یا درایو دور متغیر

27.....4-2-1- کاربردهای درایو دور متغیر

28.....4-2-2- مقایسه درایو دور متغیر با دستگاه اختناق

29.....4-3- تئوری درایو دور متغیر

33.....4-4- تعیین مشخصات سیستم پمپاژ

35.....4-5- کاربردهای دستگاه اختناق در یک سیستم پمپاژ

36.....4-6- کاربرد درایو دور متغیر در سیستم پمپاژ

37.....4-7- مدلسازی

38.....4-7-1- فرضیات مدلسازی

38.....4-7-2- منحنی سیستم (H_R)

40.....4-7-3- منحنی های عملکرد پمپ

44.....4-7-4- کنترل دبی سیال به کمک شیر اختناق و تکنولوژی VSD

44.....4-7-4-1- شکل (28-4) سناریو اول تا نهم

فصل 5: نتیجه گیری

60

61.....5-1- مقدمه

61.....5-2- جمع بندی

64.....5-3- پیشنهادات برای آینده

مراجع

65

پیوست ها

68

فهرست اشکال

2.....شکل (1-1) مصرف انرژی در جهان از سال 1980 تا سال 2030

3.....شکل (2-1) مصرف انرژی در تجهیزات مختلف

4.....شکل (3-1) سیستم پمپاژ همراه با واحد پمپ

5.....شکل (4-1) روشهای افزایش راندمان انرژی در سیستم پمپاژ سانتریفیوژ

11.....شکل (5-1) پتانسیل صرفه جویی اقتصادی در کشورهای عضو اتحادیه اروپا به تفکیک نوع بار

11.....شکل (6-1) میزان انرژی مصرف توسط بارهای مختلف در انگلستان

12.....شکل (7-1) مقایسه انرژی مصرفی کنترل فلو با شیر (نمودار بالایی) و درایور دور متغیر (نمودار پایینی)

19.....شکل (1-3) قوانین تشابه در کاربردهای پمپ و فن سانتریفیوژ

شکل (2-3) منحنی سیستم [$H_R = H_S + KQ^2$] (این منحنی میزان فشار مورد نیاز برای تامین مقدار مشخصی از دبی آمده است)

21.....

شکل (3-3) تلاقی منحنی سیستم $[H_R]$ و منحنی پمپ $[H_p]$ نقطه کار بدست میآید..... 21

شکل (4-3) بستن شیر اختناق و کم کردن دبی (جابجایی محل تلاقی منحنی پمپ و سیستم به سمت چپ (دبی کم تر)) 21

شکل (5-3) مقایسه توان در دو حالت الف (تکنولوژی VSD (منحنی سمت راست) و ب (شیر اختناق (منحنی سمت چپ) 22

شکل (6-3) میزان مصرف انرژی در یک پمپ در پنج حالت : با استفاده از شیر برگشتی، با استفاده از شیر خفه کن، با قطع و وصل پمپ، با استفاده از کوپلینگ هیدرولیک، با استفاده از کنترل کننده دور موتور 22

شکل (1-4) تکنولوژی های مختلف کنترل جریان سیال یک پمپ (تنظیم دبی سیال) 25

شکل (2-4) کنترل جریان سیال پمپ به روش اختناق در مسیر خروجی پمپ و با بستن نسبی شیر جریان سیال 26

شکل (3-4) کنترل جریان سیال پمپ به روش گذرگاه فرعی در مسیر خروجی پمپ و با باز کردن نسبی شیر بایپاس 26

شکل (4-4) کنترل جریان سیال پمپ به روش بکارگیری پمپ های موازی با ظرفیت کم 27

شکل (5-4) کنترل جریان سیال به روش تغیر دور پمپ و تغیر جریان پمپ (تغیر دور پمپ به کمک تکنولوژی VSD) .. 27

شکل (6-4) دستگاه اختناق مکانیکی در مقابل درایو فرکانس متغیر 28

شکل (7-4) میزان انرژی صرفهجویی شده توسط درایو فرکانس متغیر (در مقایسه با شیر اختناق) برای کنترل دبی جریان 29

شکل (8-4) قوانین تشابه جهت تعیین عملکرد پمپ سانتریفیوژ (با تغیر دور پمپ دبی بصورت خطی تغیر میکند) 31

شکل (9-4) قوانین تشابه جهت تعیین عملکرد پمپ سانتریفیوژ (با تغیر دور پمپ هد با توان 2 تغیر میکند) 32

شکل (10-4) قوانین تشابه جهت تعیین عملکرد پمپ سانتریفیوژ (با تغیر دور پمپ توان مصرفی با توان 3 تغیر میکند) ... 33

شکل (11-4) دو عامل مهم در تعیین منحنی سیستم (هداستاتیک و افت فشار اصطکاکی) 34

شکل (12-4) ترکیب منحنی های سیستم و پمپ 35

شکل (13-4) تغیر منحنی سیستم بعد از بکارگیری دستگاه اختناق مکانیکی جهت رسیدن به دبی $Q=80 \text{ gpm}$ 36

شکل (14-4) تغیر منحنی پمپ با کاهش دور پمپ توسط VSD جهت رسیدن به دبی $Q=80 \text{ gpm}$ 37

شکل (15-4) منحنی سیستم برای هر 9 سناریو به همراه منحنی عملکرد پمپ 39

شکل (16-4) منحنی های عملکرد پمپ 41

شکل (17-4) برآزش منحنی های هد - دبی برای پمپ 42

شکل (18-4) برآزش منحنی های راندمان پمپ TC 100-160 43

شکل (19-4) برآزش منحنی های توان پمپ TC 100-160 44

شکل (20-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 5 \text{ m} - K = 0.001)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی اول) 45

شکل (21-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 5 \text{ m} - K = 0.005)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی دوم) 47

شکل (22-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 5 \text{ m} - K = 0.010)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی سوم) 48

شکل (23-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 15 \text{ m} - K = 0.001)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی چهارم) 49

شکل (24-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 15 \text{ m} - K = 0.005)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی پنجم) 50

شکل (25-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 15 \text{ m} - K = 0.010)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی ششم) 51

شکل (26-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 25 \text{ m} - K = 0.001)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی هفتم) 52

شکل (27-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 25 \text{ m} - K = 0.005)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی هشتم) 53

شکل (28-4) کاهش دبی به اندازه 50% برای سیستم با مشخصات $(H_s = 25 \text{ m} - K = 0.010)$ از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی نهم) 54

شکل (29-4) نمودار هد تولیدی پمپ برای 9 سناریو (شیر اختناق و کاهش دور با VSD) زمانیکه دبی پمپ به اندازه 50% کاهش می یابد 56

شکل (30-4) نمودار راندمان پمپ برای 9 سناریو (شیر اختناق و کاهش دور با VSD) زمانیکه دبی پمپ به اندازه 50% کاهش می یابد 57

شکل (31-4) نمودار توان مصرفی پمپ برای 9 سناریو (شیر اختناق و کاهش دور با VSD) زمانیکه دبی پمپ به اندازه 50% کاهش می یابد 58

شکل (4-32) نمودار صرفه جویی مصرف انرژی برای 9 سناریو کاهش دور با VSD در مقایسه با زمانی که از شیر اختناق جهت کاهش دبی پمپ به اندازه 50% استفاده شده است. 59

فهرست جداول

جدول (1-1) تلفات در سیستم پمپاژ.....	4
جدول (2-1) پتانسیل فنی و اقتصادی صرفه جوئی انرژی با استفاده از موتورهای با راندمان بالا (EEM) و کنترل دور (VSD) در کشورهای عضو اتحادیه اروپا تا سال 2005.....	10
جدول (1-4) 9 سناریوی مختلف برای منحنی سیستم $(H_R=H_S+KQ^2)$	39
جدول (2-4) پمپ استفاده شده در این مطالعه از برند آپکس.....	40
جدول (3-4) مقادیر ضرایب معادله (4-6) حاصل از برازش منحنی.....	41
جدول (4-4) مقادیر ضرایب معادله (4-8) حاصل از برازش منحنی.....	43
جدول (5-4) شرایط عملکردی پمپ و سیستم برای 9 سناریو مورد بررسی در این پژوهش.....	55

فصل 1:

کلیات پژوهش

1-1- مقدمه

انرژی نیاز اساسی بخش های صنعتی و خانگی است. نرخ هشداردهنده افزایش جمعیت جهان، تاثیر زیادی بر مصرف انرژی داشته است [۱]. در طول سالیان، افزایش استفاده از منابع متعارف برای تولید انرژی الکتریسیته باعث کاهش منابع انرژی و تغییرات شدید آب و هوایی شده است. این مسئله منجر به بحران انرژی در جهان خواهد شد که نتیجه آن افزایش هزینه انرژی و نوسان در قیمت آن خواهد بود.

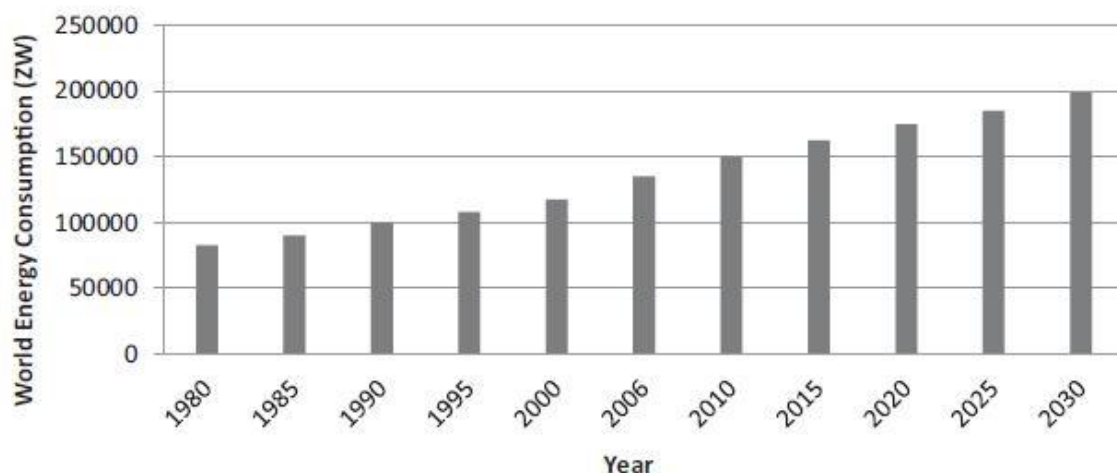
پمپ ها سالیانه بخش عظیمی از انرژی تولیدی را مصرف می کنند در حالیکه راندمان آنها بدلیل *oversize* بودن و همچنین کارکرد پمپ در خارج از محدوده ی طراحی بازده مطلوبی ندارند در صنعت در بسیاری از موارد جهت کنترل دبی و کاهش دبی جریان سیال از شیر اختناق استفاده می کنند و با بستن نسبی شیر جریان خروجی از پمپ را کاهش می دهند. مقدار زیادی از انرژی سیال در شیر اختناق به هدر می رود. تکنولوژی VSD (درایور دور متغیر¹) از روش های جدید کنترل دبی سیال است که با کاهش دور الکتروموتور سبب کاهش دور پمپ شده و از این طریق دبی جریان سیال را کاهش داده و کنترل می کند. پایین آوردن دور پمپ به کمک VSD سبب صرفه جویی در مصرف انرژی می گردد.

در این پژوهش مدلسازی مصرف انرژی برای دو حالت کنترل دبی سیال به کمک دستگاه شیر اختناق و تکنولوژی VSD ارائه شده است بدین منظور 9 سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و میزان صرفه جویی مصرف انرژی برای زمانی که از VSD استفاده شده است بدست آمد. در این 9 سناریو، دبی و فشار مورد نیازی که پمپ می بایست تامین کند متفاوت و وابسته به مشخصات لوله و تجهیزات و دبی فرآیند مورد نظر است.

¹ Variable Speed Driver

1-2- اهمیت و ضرورت تحقیق

پیش بینی می شود مصرف انرژی در جهان از سال 2016 تا 2030 تا 30 درصد افزایش یابد [2]. همان طور که در شکل (1-1) نشان داده شده تخمین زده می شود مصرف انرژی در جهان از مقدار 162500 زپتووات در سال 2015 به مقدار 198654 زپتووات در سال 2030 افزایش خواهد یافت. در 15 سال آینده (تا سال 2030) مصرف انرژی صنعتی به تنهایی به 71961 زپتووات (1.4 درصد به ازای هر سال) خواهد رسید [1-2]. بنابراین نگرانی درخصوص افزایش مصرف انرژی باید توسط محققان و جامعه بین المللی بیان شود تا بر کسری انرژی در آینده غلبه کرده و پتانسیل های صرفه جویی در مصرف انرژی شناسایی شوند.



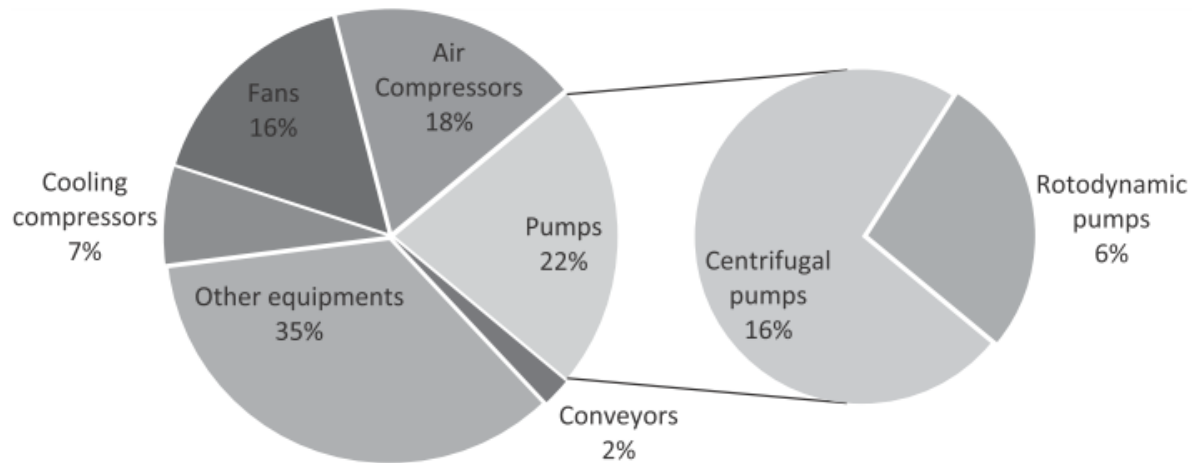
شکل (1-1). مصرف انرژی در جهان از سال 1980 تا سال 2030 [3]

1-2-2- مصرف انرژی در سیستم پمپاژ

طبق گزارش آژانس بین المللی انرژی [3]، موتورهای الکتریکی 46 درصد از برق تولید شده در جهان را مصرف می کنند. این موتورها نزدیک به 70 درصد از کل برق صنعتی در صنایع را مصرف می کنند.

مطابق گزارش تهیه شده توسط کمیسیون اروپا [4]، سیستم پمپاژ به تنهایی حدود 22 درصد از انرژی تأمین شده توسط موتورهای الکتریکی در جهان را مصرف می کند (شکل (1-2)). بنابراین بررسی

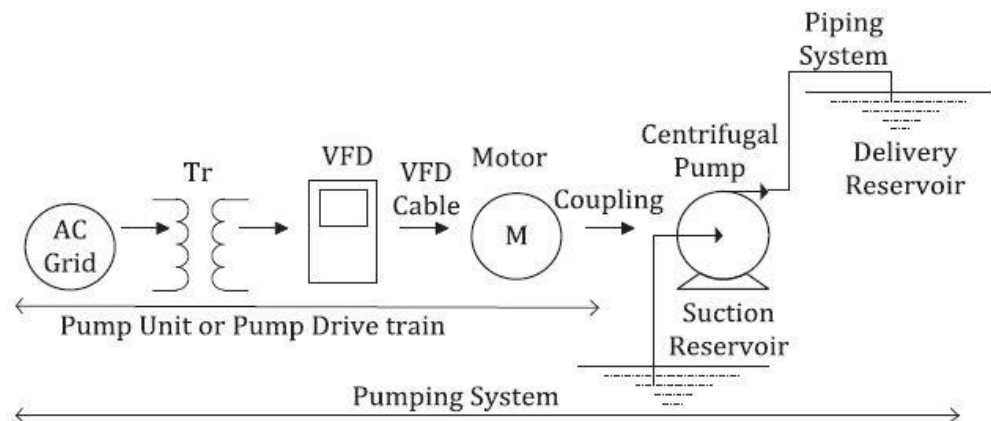
روش‌های صرفه‌جویی در مصرف انرژی و نیز اظهارنظر در مورد روش‌های نوظهور افزایش بهره‌وری انرژی در سیستم‌های پمپاژ مفید خواهد بود.



شکل (2-1) مصرف انرژی در تجهیزات مختلف [6]

سیستم پمپاژ شامل واحد پمپ، مخزن مکش، مخزن دهش، پیکربندی لوله و مایعی که قرار است پمپ شود می‌باشد. واحد پمپ شامل منبع تغذیه جریان متناوب، ترانسفورماتور (مبدل)، درایو دور متغیر¹ و موتور است [5]. در صنایع معمولاً استفاده از درایو دور متغیر جهت کنترل خروجی (جریان) پمپ ترجیح داده می‌شود. برای این کار درایو دور متغیر، دور منبع تغذیه را تغییر می‌دهد این فرکانس وارد موتور القایی می‌شود و از این طریق جریان خروجی از پمپ کنترل می‌شود. روند آن در شکل (1-3) نشان داده شده است [6].

¹ Variable frequency drive (VFD)



شکل 3-1) سیستم پمپاژ همراه با واحد پمپ [8]

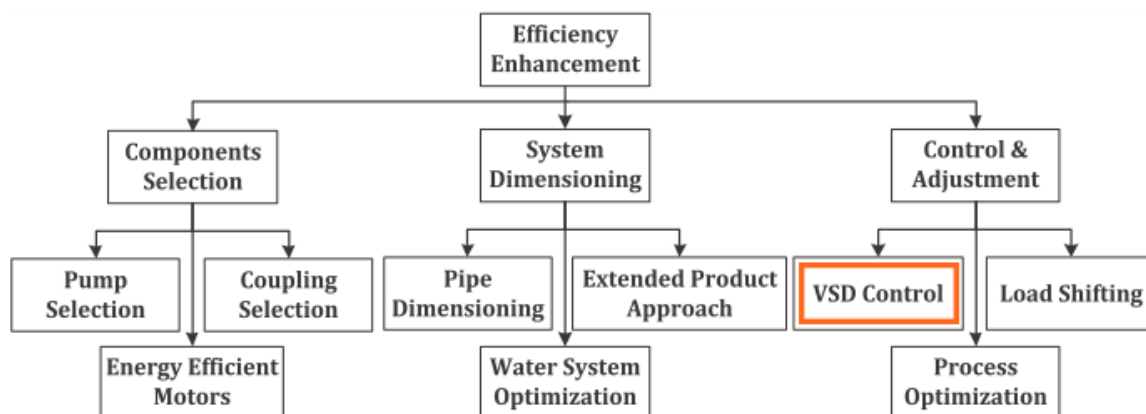
از لحاظ عملی، هنگامی که انرژی از یک شکل به شکل دیگر تبدیل می‌شود مقداری از آن تلف می‌شود [۷]. این تلفات انرژی که شامل تلفات هرکدام از اجزای سیستم پمپاژ (از مبدل تا سیستم لوله‌کشی) می‌باشد توسط وزارت انرژی آمریکا مورد مطالعه قرار گرفت [۸]. وزارت انرژی آمریکا (جدول 1-1) نشان می‌دهد که حداکثر تلفات ممکن در سیستم پمپاژ ناشی از طراحی ناکارآمد سیستم لوله‌کشی است که باعث می‌شود 40 تا 50 درصد انرژی تلف شود [8]. راندمان عملی پمپ 85 تا 90 درصد [۹]، راندمان موتور الکتریکی بیشتر از 90 درصد [۱۰] و راندمان درایو فرکانس متغیر حدود 95 تا 98 درصد می‌باشد [۱۱].

جدول (1-1) تلفات در سیستم پمپاژ

	Component in pumping system	Efficiency (%)	Losses (%)
1	Piping system	50-60	40-50
2	Pumps	85-90	10-15
3	Coupling	~99	~1
4	Motors	>90	<10
5	VFD cables	~98	~2
6	VFDs	95-98	2-5
7	Transformers	~99	~1

3-2-1- روش‌های افزایش بهره‌وری انرژی

در این مطالعه، روش افزایش راندمان انرژی در سیستم پمپاژ سانتریفیوژ به کمک تکنولوژی درایور دور متغیر بررسی می‌شود. در مجموع روش‌های افزایش راندمان انرژی به سه دسته تقسیم می‌شوند: انتخاب اجزا، تعیین ابعاد سیستم پمپاژ و کنترل پمپ دور متغیر (شکل (4-1) را ببینید) [۱۲].



شکل (4-1) روش‌های افزایش راندمان انرژی در سیستم پمپاژ سانتریفیوژ [2]

بهبود راندمان انرژی در سیستم پمپاژ با نصب درایوهای فرکانس متغیر به‌طور گسترده‌ای انجام می‌شود [۱۳-۱۴]. درایور فرکانس متغیر تنها وضعیت عملیاتی موتورهای الکتریکی را تخمین می‌زند (سرعت، گشتاور و جریان استاتور) و وضعیت عملیاتی پمپ (شامل دبی جریان، هد و راندمان) را در نظر نمی‌گیرد [۱۵-۱۶]. بدون شک روش‌های افزایش راندمان انرژی در سیستم پمپاژ در آینده به سمتی پیش خواهند رفت که وضعیت عملیاتی پمپ را نیز کاملاً تخمین بزنند. در همین راستا، روش‌های مختلف تخمین نقطه عملیاتی و دقت تخمین آن‌ها به عنوان بخشی از این مطالعه مورد بحث قرار گرفته است.

پیش بینی مصرف انرژی از سال 1980 تا سال 2030 در شکل (1-1) آمده است و نیز سهم قابل توجه سیستم پمپاژ در مصرف انرژی (شکل (2-1) را ببینید) ارائه می‌شود. سپس روش‌های افزایش راندمان انرژی به سه بخش اصلی طبقه‌بندی شده (شکل (4-1) را ببینید).

1-3- هدف از پژوهش

هدف از این پژوهش، مدلسازی مصرف انرژی برای دو حالت کنترل دبی سیال به کمک دستگاه شیر اختناق و کنترل دبی با تکنولوژی VSD است. در صنعت بطور مرسوم از شیر اختناق برای کنترل دبی بین 0 تا 100٪ استفاده می شود.

هدف کاربردی این پژوهش، ارائه یک مدل عددی به مهندسین انرژی، مکانیک و شیمی و جهت محاسبه هدر رفت انرژی در شیر اختناق و بررسی میزان صرفه جویی انرژی با بکارگیری تکنولوژی VSD است.

1-4- سوالات تحقیق

مهمترین سوالات تحقیق به شرح زیر است.

- میزان مصرف انرژی پمپ، زمانی که دبی مورد نیاز به اندازه ی 50٪ به کمک شیر اختناق کاهش یابد چه اندازه است؟
- میزان مصرف انرژی پمپ، زمانی که دبی مورد نیاز به اندازه ی 50٪ به کمک تکنولوژی VSD کاهش یابد چه اندازه است؟
- میزان صرفه جویی انرژی زمانی که از تکنولوژی VSD بجای شیر اختناق جهت کنترل دبی استفاده می کنیم چه اندازه است؟
- زمانی که دبی مورد نیاز به اندازه ی 50٪ با بستن شیر اختناق کاهش یابد فشار تولیدی پمپ چقدر افزایش می یابد؟

5-1- بیان مساله

جهت کنترل دبی سیال در فرآیندهای صنعتی روش های مختلفی از جمله بکارگیری شیر اختناق استفاده می شود. بکارگیری شیر اختناق بصورت دائم سبب هدر رفت انرژی می شود. کاهش دور پمپ به کمک تکنولوژی VSD یک راه حل دائم و بصره جهت کنترل و کاهش دبی سیال است. بدین منظور 9 سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و میزان صرفه جویی مصرف انرژی برای زمانی که از VSD استفاده شده است بدست آمد. در این 9 سناریو، دبی و فشار مورد نیازی که پمپ می باست تامین کند متفاوت و وابسته به مشخصات لوله و تجهیزات و دبی فرآیند مورد نظر است.

6-1- موتورهای مجهز به کنترل کننده دور موتور

استفاده از موتورهای مجهز به کنترل کننده دور موتور، امکان اعمال تغییرات لازم در سرعت موتور فن ویا پمپ را بطور دائم فراهم آورده و بدین ترتیب میتوان با توجه به فرآیند مورد نظر از اتلاف انرژی ایجاد شده در تنظیم کننده های مکانیکی جلوگیری نمود وبا استفاده از درایو موتور به بار تطبیق داده شده و هر گونه نیاز به خاموش و روشن کردن موتور و یا ادوات تنظیم کننده نظیر شیر یا دمپر حذف می گردد. همچنین کنترل سرعت دقیق و متعاقب آن توان خروجی قابل دسترسی بوده و با توجه به استفاده از مدارات الکترونیکی، استهلاک قسمتهای کنترل کننده ها درصد بسیار پایین خواهد بود. تصمیم گیری در مورد استفاده از موتور با کنترل کننده دور متغیر بستگی به نوع کاربرد مورد نظر دارد از آنجا که هزینه اولیه این سیستمها (کنترل کننده دور موتور) بیش از سایر روشها می باشد وبا توجه به اینکه صرفه جویی ناشی از بالا بردن بازدهی تنها بصورت کاهش هزینه راهبری نمایان می شود، لذا استفاده از موتورهای مجهز به کنترل کننده دور در طول زمان منجر به صرفه جویی اقتصادی می شود. معمولاً بسته به نوع کاربرد زمان بازگشت سرمایه گذاری بین یک تا سه سال متغیر خواهد بود.

متأسفانه در اکثر موارد بهترین عامل در انتخاب محرک قیمت اولیه است. بدین معنی که سیستم بر مبنای کمیته سازی هزینه اولیه انتخاب می شود. در حالیکه در طول عمر مفید آن هزینه قابل توجهی

صرف انرژی تلف شده و یا تعمیر و نگهداری می شود.

کنترل کننده های دور موتور انواع مختلفی دارند آنها قادرند انواع موتورهای AC و DC را کنترل کنند.

قیمت کنترلرها وابسته به نوع تکنولوژی بکار رفته در ساختمان آنها می باشد. ساده ترین روش کنترل موتورهای AC روش تثبیت نسبت ولتاژ به فرکانس (یا کنترل V/F ثابت) می باشد اینکه این روش بطور گسترده در کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می گیرد. این نوع کنترلرها از نوع اسکالر بوده و بصورت حلقه باز با پایداری خوب عمل می کنند. مزیت این روش سادگی سیستمهای کنترلی آن است و تعامل این نوع کنترلرها برای کاربردهای با پاسخ سریع مناسب نیم باشند. روباتها و ماشینهای ابزار نمونه هایی از کاربردهای با دینامیک بالا هستند. در این کاربردها روشهای کنترلی برداری استفاده می شود. در روشهای کنترل برداری با تفکیک مولفه های جریان استاتور به دو مولفه تورک ساز و فلوساز کنترل آنها با استفاده از گولاتورهای PI ترتیبی داده می شود که موتور AC نیز در دسترس خواهد بود. برای مثال پاسخ گشتاور در روشهای برداری حدود 10-20ms و در روشهای کنترل مستقیم گشتاور (Direct Tor qu Control) این زمان حدود 5ms است.

1-6-1- مزایای استفاده از کنترل کننده های دور موتور:

مزایای استفاده از کنترل کننده های دور موتور هم در بهبود بهره وری تولید و هم در صرفه جویی مصرف انرژی در کاربردهائی نظیر فنها، پمپها، کمپرسورها و دیگر محرکه های کارخانجات در سالهای اخیر کاملاً مستند سازی شده است. کنترل کننده های دور موتور قادرند مشخصه های بار را به مشخصه های موتور تطبیق دهند. این اسباب توان راکتیو ناچیزی از شبکه می کشند و لذا نیازی به تابلوهای اصلاح فریب بار ندارند در زیر به مزایای استفاده از کنترل دور موتور اشاره می شود:

در صورت استفاده از کنترل کننده های دور موتور بجای کنترلرهای مکانیکی، در کنترل جریان سیالات بطور موثری در موثر انرژی صرفه جویی حاصل می شود. این صرفه جویی علاوه بر پیامدهای

اقتصادی آن موجب کاهش آلاینده های محیطی نیز می شود.

ویژگی اینکه کنترل کننده های دور موتور قادرند موتور را نرم راه اندازی کند موجب می شود علاوه بر کاهش تنشهای الکتریکی روی شبکه، از شوکهای مکانیکی به بار نیز جلوگیری می شود. این شوکهای مکانیکی می تواند باعث استهلاک سریع قسمت های مکانیکی بلبرینگها و گیربکس و نهایتاً قسمتهایی از بار شوند. راه اندازی نرم هزینه های نگهداری را کاهش داده و به افزایش عمر مفید محرکه ها و قسمت های دوار منجر خواهد شد.

جریان کشیده شده از شبکه در هنگام راه اندازی موتور با استفاده از درایو کمتر از 10٪ جریان اسمی موتور است.

کنترل کننده های دور موتور نیاز به تابلوی اصلاح ضریب قدرت ندارند.

در صورتی که نیاز بار ایجاب کند با استفاده از کنترل کننده دور، موتور می تواند در سرعت های پایین کار کند. کار در سرعت های کم منجر به کاهش هزینه های تعمیر و نگهداشت ادواتی نظیر بلبرینگها، شیرهای تنظیم کننده و دمپرها خواهد شد.

یک کنترل کننده دور قادر است رنج تغییرات دور را نسبت به سایر روش های مکانیکی تغییر دور، به میزان قابل توجهی افزایش دهد. علاوه بر آن از مسائلی چون لرزش تنش های مکانیکی نیز جلوگیری خواهد شد.

کنترل کننده های دور مدرن امروزی با مقدرات نرم افزاری قوی خود قادرند راه حل های مناسبی برای کاربردهای مختلف صنعتی ارائه دهند.

1-6-2- مدیریت بهینه سازی مصرف انرژی و نقش کنترل کننده های دور موتور

امروزه در کشورهای صنعتی الزامات زیست محیطی از یکسو و از سوی دیگر، مدیریت بهینه سازی انرژی بصورت یک امر غیر قابل اجتناب درآورده است. مجموعه اقداماتی که برای صرفه جویی انرژی در کارخانجات صورت می گیرد: شامل مواردی چون جایگزینی موتورهای الکتریکی با انواع موتورهای با

بازدهی بالا، استفاده از کنترل کننده های دور موتور در کاربردهائی که ائتلاف انرژی در آنها زیاد است. بازیافت انرژی از پروسه های حرارتی و نظایر آنها می شود. نتایج اعمال چنین اقداماتی نشان می دهد در موارد زیادی و بخصوص در جاهائی که از فنها، پمپها و کمپرسورها در فرآیند تولید استفاده می شود. بکارگیری کنترل کننده های دور موتور علاوه بر انعطاف پذیر نمودن کنترل فرآیند تاثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی داشته است. در بسیاری از موارد زمان بازگشت سرمایه بین یک تا سه سال می باشد. کمتر از 10٪ موتورهای مجهز به درایو هستند. در حالیکه در بیش از 25٪ آنها استفاده از درایو توجیه اقتصادی دارد. براساس مطالعات انجام گرفته توسط اتحادیه اروپا تا سال 2005 میلادی پتانسیل صرفه جوئی انرژی مانع بر 63/5 TWh در منابع کشورهای عضو اتحادیه اروپا وجود دارد که این میزان بیش از 44/7 VTWh آن توجیه اقتصادی دارد. این میزان صرفه جویی انرژی تنها در سایه استفاده از موتورهای با راندمان بالا در درایو بدست می آید که سهم درایو در صرفه جویی دارای توجیه اقتصادی حدود 63٪ است. نتایج چنین مطالعاتی رابط و خلاصه در جدول (1-2) مشاهده می کنید.

جدول (1-2) پتانسیل فنی و اقتصادی صرفه جوئی انرژی با استفاده از موتورهای با راندمان بالا

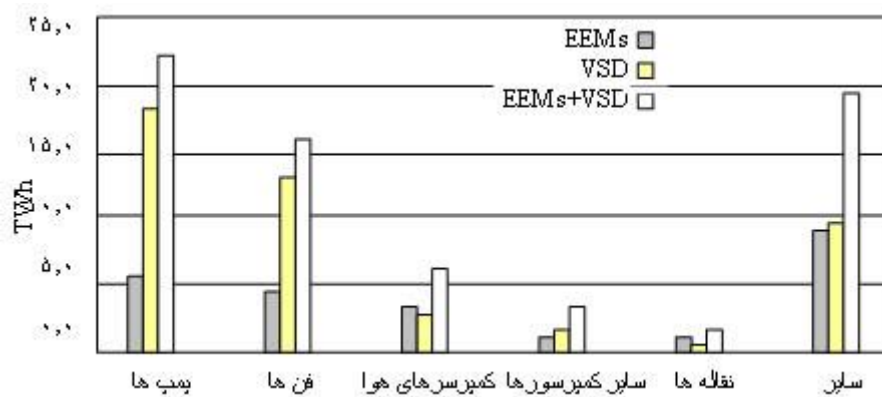
(EEM) و کنترل دور (VSD) در کشورهای عضو اتحادیه اروپا تا سال 2005 آمده است.

جدول (1-2) پتانسیل فنی و اقتصادی صرفه جوئی انرژی با استفاده از موتورهای با راندمان بالا (EEM) و کنترل دور (VSD) در کشورهای عضو اتحادیه اروپا تا سال 2005

VSD+EEM	کنترل کننده دور موتور VSD	موتور راندمان بالا IEEM		
			بخش صنعت	پتانسیل فنی
۴۶,۲	۲۵,۵	۱۲,۰		
۱۷,۲	۱۲,۲	۵,۷	سایر	
۶۲,۵	۴۷,۸	۱۷,۸	جمع (TWh)	
۲۲,۶	۲۲,۴	۱۲,۰	بخش صنعت	پتانسیل اقتصادی
۱۱,۱	۵,۷	۵,۷	سایر	
۴۴,۷	۲۸,۱	۱۷,۸	جمع (TWh)	

مطالعه فوق با تفکیک بار پتانسیل اقتصادی صرفه جویی انرژی را نیز در اتحادیه اروپا مختص نموده

است که نتایج آنرا در شکل (1-5) مشاهده می‌کند.

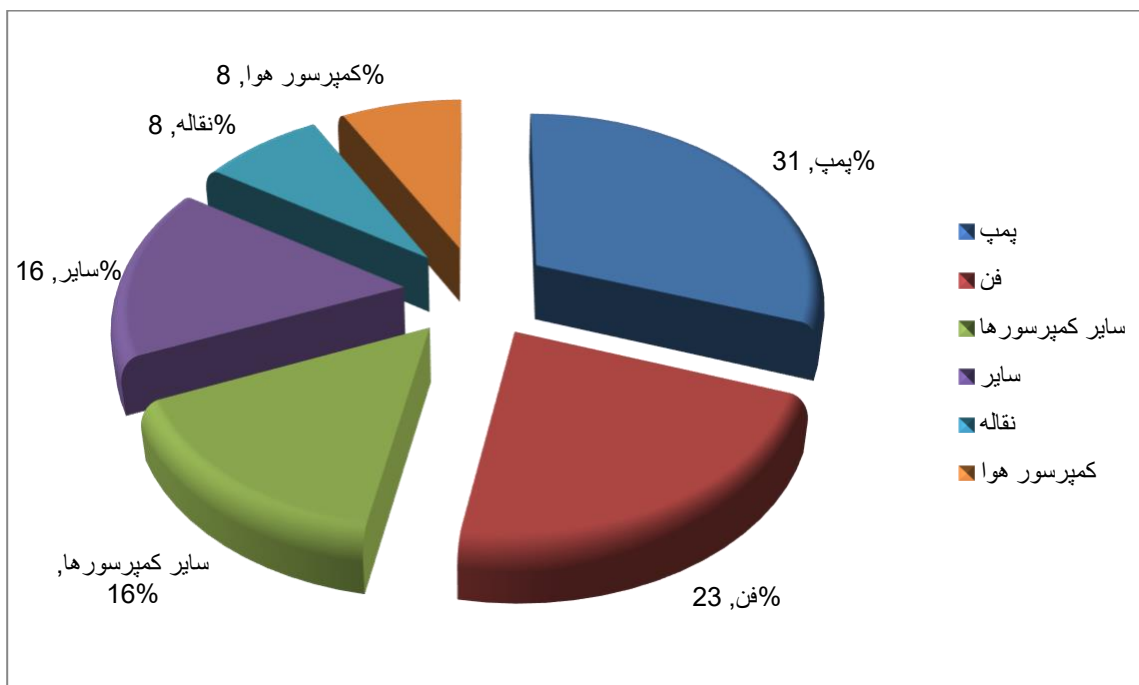


شکل (1-5) پتانسیل صرفه جویی اقتصادی در کشورهای عضو اتحادیه اروپا به تفکیک نوع بار [5]

مطابق شکل (1-6) چیزی حدود 40 درصد انرژی مصرفی در بخش صنعت پمپها و فنها مصرف

می‌شود. برای مثال در انگلستان ترکیب مصرف کنندگان انرژی در موتورها و در کاربرهای صنعتی بصورت

زیر است:



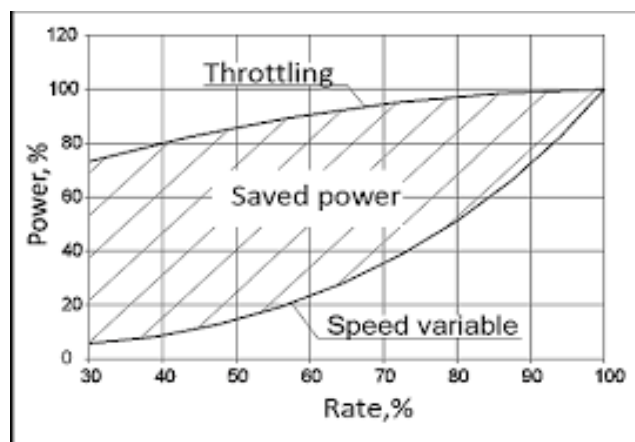
شکل (1-6) میزان انرژی مصرف توسط بارهای مختلف در انگلستان [7]

اغلب این سیستمها موتورهای القایی با روتور قفس سنجابی استفاده می‌کنند و خروجی توسط

ادواتی چون شیرهای تنظیم کننده و دمپرها کنترل می‌شوند. متأسفانه مقادیر قابل توجهی انرژی توسط این فن‌ها و پیچ‌ها تلف می‌شوند موتورهای بکار رفته در اغلب این ادوات از مقدار مورد نیاز بزرگتر بوده و سیستم‌های مکانیکی تنظیم کننده جریان سیالات در آنها بسیار تلفاتی می‌باشند. به این عوامل باید هزینه های قابل توجه تعمیر و نگهداشت نیز اضافه شود با توجه به اینکه هزینه های خرید پمپ معمولاً کمتر از 5 درصد هزینه های بهره برداری آن در طول عمر سیستم پمپ است. کیفیت بهره برداری عامل مهمتری در تصمیم گیری برای انتخاب سیستمهای پمپ به شمار می‌رود.

انتخاب پمپ ها معمولاً بر اساس حداکثر دبی مورد انتظار صورت می‌گیرد در حالیکه اغلب اوقات هرگز فلو ی ماکزیم مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. این امر منجر به بزرگ شدن پمپ ها شده و بدین ترتیب مقدمات کار برای اتلاف انرژی و استهلاک هر چه سریعتر سیستم های پمپ فراهم می‌شود. کارکرد موتور در دور حداکثر خود سبب اتلاف انرژی می‌گردد. از سوی دیگر برای کنترل دبی لازم خواهد بود از ادواتی نظیر شیرخفه کن استفاده گردد. با استفاده از کنترل کننده های دور میتوان جریان سیالات در پمپ ها را با اعمال دور متغیر موتور کنترل نمود.

امروزه این روش بدلیل انعطاف پذیری و صرفه جویی اقتصادی قابل توجه جایگزین روشهای فنی متکی بر تنظیم جریان سیال با استفاده از شیرهای تنظیم کننده مکانیکی و دمپرها می‌شود. در شکل (1-7) تفاوت در روش و میزان مصرف انرژی نشان داده شده است.



شکل 1-7) مقایسه انرژی مصرفی کنترل فلو با شیر (نمودار بالایی) و درایور دور متغیر (نمودار پایینی) [8]

فصل 2:

مروری بر مقالات

1-2- مقدمه

بحث انرژی از دو دیدگاه اقتصادی و زیست محیطی حائز اهمیت است. بهینه سازی مصرف انرژی به این معنی است که بتوان با استفاده از تجهیزات و یا مدیریت بهتر همان کار را با مصرف انرژی کمتر انجام داد، اعمال مدیریت انرژی، به منظور درک سیستم های موجود و طریقه استفاده از آن ها، می تواند در کاهش مصرف انرژی نقش مهمی داشته باشد. در سیاست گذاری انرژی باید سازمان ها رویکرد سیستمی داشته باشند. برای مثال در بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی هدف تنها کاهش هزینه های انرژی یک یا چند الکتروموتور مشخص نیست، بلکه باید آثار اقدامات مورد نظر روی سایر سیستم ها به دقت مورد توجه قرار گیرد. در اغلب بخشهای صنعتی انرژی الکتریکی مهمترین منبع انرژی صنعت بشمار می رود. از آنجا که موتورهای الکتریکی مصرف کننده اصلی انرژی الکتریکی در کارخانجات صنعتی می باشند. برای درک اهمیت بهینه سازی مصرف انرژی به این مورد اشاره می شود که اگر راندمان موتور های الکتریکی القائی موجود در اروپا تنها به میزان 41٪ افزایش یابد، هزینه مصرف انرژی الکتریکی به میزان ۱۱۶ میلیارد دلار در سال کاهش خواهد یافت. آمار منتشر شده از سوی وزارت نیرو نشان می دهد در سال ۱۳۷۳، 39 درصد از کل انرژی الکتریکی مصرف شده در ایران توسط موتورهای الکتریکی بوده است، البته این میزان در کشورهای صنعتی تا ۶۵ می رسد و شاخص خوبی برای نشان دادن سطح صنعتی شدن یک کشور می باشد. اهداف بهینه سازی مصرف انرژی را می توان به صورت زیر بیان نمود: ۱- استفاده منطقی از انرژی ۲- حفظ منابع انرژی ۳- اصلاح میزان مصرف انرژی در بخش های مصرف کننده انرژی ۴- کاهش گازهای گلخانه ای و آلودگی هوا ۵- اصلاح وضعیت موجود، می توان اقدامات مختلفی برای صرفه جویی انرژی الکتریکی در الکتروموتورهای صنعتی به عمل آورد. چیزی حدود ۴۰ درصد انرژی مصرفی در بخش صنعت در پمپ ها و فن ها مصرف می شود.

2-2- بررسی سیستم های فرکانس متغیر

با افزایش کاربرد موتورهای القایی در صنعت بحث کنترل این موتورها اهمیت ویژه ای پیدا کرده

است. درایور الکتریکی در موتورهای الکتریکی عبارت است سیستمی که سرعت و گشتاور یک موتور الکتریکی را کنترل می کند. درایو VFD یک سیستم برای کنترل کردن سرعت چرخش یک موتور AC با کنترل کردن فرکانس تغذیه اعمال شده به موتور الکتریکی است، VFD به نامهای AFD درایو فرکانس قابل تنظیم) یا VSD درایو سرعت متغیر) نیز خوانده می شود. همچنین به مدارهای اینورتری که دارای فرکانس و ولتاژ خروجی قابل تغییر باشند درایو الکتریکی گفته می شود. این درایو بر این اصل عمل می کند که سرعت سنکرون یک موتور AC به فرکانس تغذیه آن موتور AC بستگی دارد.

قوانین افینیتی در کاربرد های پمپ و فن های سانتریفوژ پایه نظری صرفه جویی انرژی با استفاده از درایور هستند.

3-2- تحلیل و بررسی VFD روی پمپ

انتخاب پمپ ها معمولاً بر اساس حداکثر دبی مورد انتظار صورت می گیرد. در حالیکه اغلب اوقات هرگز دبی ماکزیمم مورد استفاده قرار نمی گیرد. این امر منجر به بزرگ شدن پمپ ها شده و بدین ترتیب مقدمات کار برای اتلاف انرژی و استهلاک هر چه سریعتر سیستم های پمپ فراهم می شود. اگر یک پمپ در دور نامی خود کار کند و دبی خروجی پمپ به مصرف برسد سیستم در راندمان مطلوب خود کار خواهد کرد. اما اگر تنها ۵۰ درصد دبی حداکثر مورد نیاز باشد چه اتفاقی خواهد افتاد؟ بدیهی است که در این حالت نیز موتور در دور نامی خود کار خواهد کرد و توان مصرفی اضافی توسط موتور تلف خواهد شد. از سوی دیگر برای کنترل دبی خروجی لازم خواهد بود از ادوات مقاومتی نظیر شیر خفه کن استفاده گردد. با استفاده از کنترل کننده های دور موتور می توان جریان سیالات در پمپ ها را با اعمال تغییر دور موتور، کنترل نمود. در پمپ ها توان مصرفی با توان سوم موتور سرعت متناسب است. با توجه به اینکه اثر فشار برگشتی استاتیک در کارکرد سیستم کانال هوا یا اثر فشار هد استاتیک در کاربرد پمپ در نظر گرفته نمی شود اندازه فشار برگشتی استاتیک اثر معکوس روی توان مصرفی و صرفه جویی انرژی دارد پس توان مصرفی با سرعت موتور یا دبی پمپ متناسب است. اگر پمپ در کمتر از مقدار نامی کار کند

استفاده از VFD باعث صرفه جویی انرژی می باشد ولی فاکتور تعیین کننده در سیستم فرکانس متغیر برای صرفه جویی انرژی پروفیل بار می باشد که نشان می دهد در یک دوره سالانه چه مدت زمانی را و به چه مقدار پمپ در در مقدار دبی کمتر از دبی نامی کار کرده است.

اگر و همکاران [۱۷] شبکه آب رسانی شهر آنتپ در ترکیه را با استفاده از یک مدل دینامیکی بررسی کردند. نتایج شبیه سازی تغییرات ارتفاع آب در مخزن انتهایی و دبی ایستگاه پمپاژ، جهت کنترل هیدرولیکی شبکه آبرسانی این شهر به کار گرفته شده است.

کارستن اسکوموز [۱۸] مدل دینامیکی الکتروپمپ گریز از مرکز را با هدف عیب یابی در این پمپ ها ارائه داد. ذوالفقار و همکاران [۱۹] سیستم کنترل سرعت در موتورهای القایی دورمتغیر را با استفاده از روش کنترل مستقیم گشتاور در محیط نرم افزار سیمولینک متلب شبیه سازی کردند. غفوری و همکاران [۲۰] به مدلسازی دینامیک الکترو پمپ های گریز از مرکز موازی دور متغیر با کنترل فرکانسی با استفاده از نرم افزار سیمولینک متلب پرداختند. در این تحقیق، مدل دینامیک الکتروپمپ گریز از مرکز طبقاتی سه فاز دور متغیر ارائه و نتایج به دست آمده با نتایج واقعی در دوره های مختلف مقایسه شده است.

یاری [۲۱] سیستم کنترل و پایش هوشمند ایستگاه پمپاژ در مقیاس آزمایشگاهی را طراحی کرد و ساخت. در این تحقیق یک تابلو فرمان هوشمند مجهز به درایو فرکانس متغیر با قابلیت تغییر دور الکتروموتور طراحی شد و به کمک شبیه سازی رایانه ای در محیط نرم افزاری و آزمون های آزمایشگاهی، عملکرد سامانه در پاسخ به تغییرات دور پمپ بررسی گردید. نتایج بررسی ها نشان داد که سیستم قادر است تا با دقتی قابل قبول هیدروگراف های جریان دلخواه را ایجاد کند. کیسر و همکاران [۲۲] انرژی مصرفی ایستگاه های پمپاژ در شبکه فاضلاب در شهر در هلند و انسانا با استفاده از مدلسازی بررسی کردند در پژوهش آنها شیوه بهره برداری بهینه به کمک VFD، جهت صرفه جویی حداکثری مصرف برق مورد بررسی قرار گرفت.

هنسون و همکاران [۲۳] بیا آزمایش های میدانی در پنج سایت آبیاری تحت فشار در امریکا نشان دادند که بعد از ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ساعت کار کرد الکتروپمپ دور متغیر در سال، هزینه های مرتبط با اجرای

سیستم پمپاژ دور متغیر در مقایسه با روش استفاده از شیر برای کنترل دبی، قابل توجیه است. مورو و همکاران [۲۴]، روشی برای بهینه سازی منحنی های راندمان و مشخصه پمپ در ایستگاه پمپاژ، برای آبیاری درختان زیتون در منطقه لاپینادای اسپانیا ارائه کردند. این محققان با در نظر گرفتن دبی، فشار و توزیع آب در سراسر فصل آبیاری، به عنوان سه پارامتر اصلی در طراحی ایستگاه های پمپاژ، به بررسی منحنیهای مشخصه پمپ و سیستم پرداختند، تعداد بهینه پمپ را تعیین و این موضوع را روشن کردند که آیا به پمپ های دور متغیر نیاز هست یا نه و سرانجام استفاده از پمپهای دور متغیر را برای این ایستگاهها پیشنهاد کردند.

فصل 3:

مبانی نظری

3-1- مقدمه

در این بخش روابط حاکم جهت محاسبه توان الکتریکی مصرفی پمپ ارائه می‌گردد. در ادامه قوانین افینیتی مربوط به محاسبه دبی، هد و توان پمپ در سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

3-2- قوانین افینیتی (تشابه) در کاربردهای پمپ و فن:

قوانین تشابه در کاربردهای پمپ و فن سانتریفوژ پایه نظری صرفه جوئی انرژی با استفاده از درایو هستند. بر طبق این قوانین دوریک پمپ یا فن سانتریفوژ در روابط زیر حاکم است:

N: سرعت

$$Q \sim N$$

Q: فلویا دبی حجمی

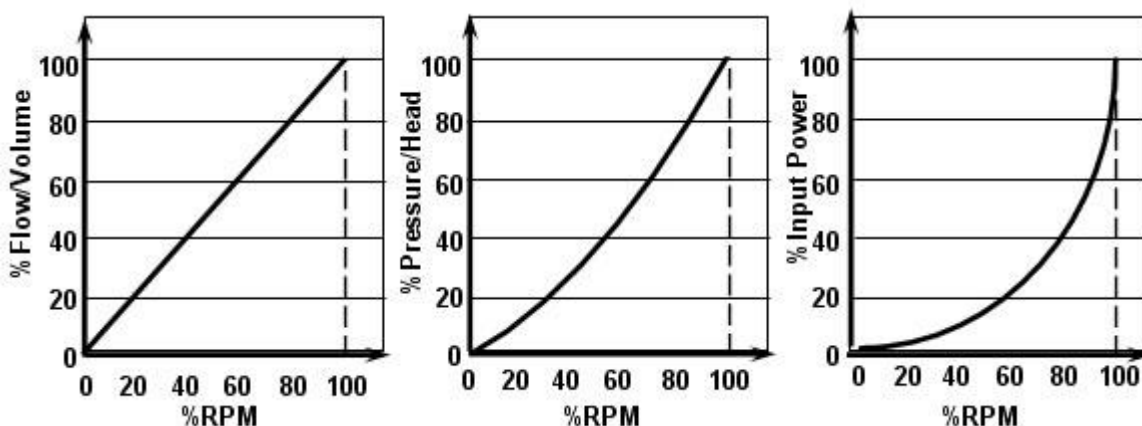
$$H \sim N^2$$

H: هد یا فشار

$$P \sim N^3$$

P: توان ورودی

با توجه به شکل (3-1)، فلوی/دبی حجمی بصورت خطی با دور پمپ / فن تغییر می‌کند برای مثال اگر دور موتور نصف شود فلونیز نصف خواهد شد از طرف دیگر با توجه به منحنی فشار یا هد متناسب با مربع دور تغییر می‌کند. در این حالت اگر دور موتور نصف شود. فشار 4 برابر کاهش پیدا کرده و به 25٪ خواهد رسید.

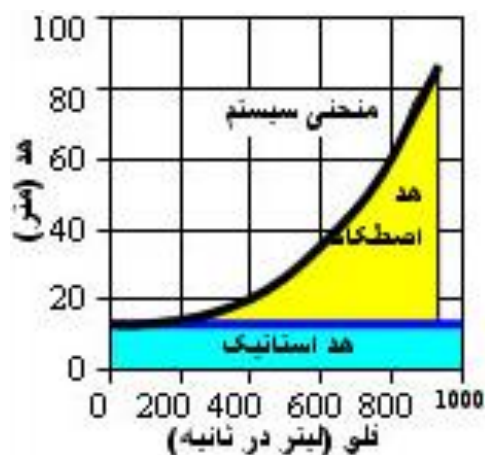


شکل 3-1) قوانین تشابه در کاربردهای پمپ و فن سانتریفوژ [9]

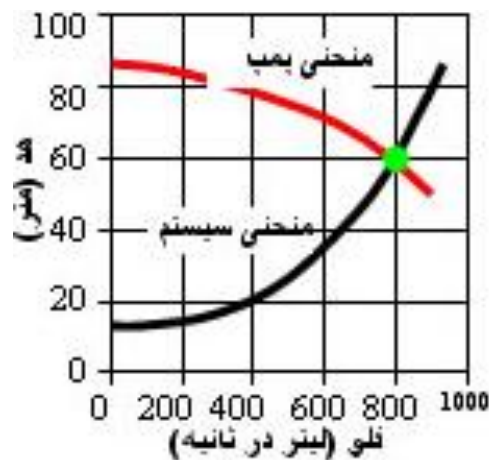
منحنی سمت راست (شکل (3-1)) نشان می دهد که اگر دور موتور نصف شود مصرف توان 8 برابر کاهش پیدا کرده و به $12/5\%$ خواهد رسید به خاطر می سپاریم با استفاده از کنترل کننده های دور موتور و کاهش تنها 15 درصد دور میتوان به میزان 40 درصد در مصرف انرژی صرفه جویی کرد.

شکل (3-2) مشخصات یک سیستم را نشان می دهد. هد اساتیک (H_S) عبارتست از اختلاف ارتفاع پمپ و تانک مقصد بدیهی است که اگر یک پمپ نتواند به این ارتفاع غلبه کند دبی خروجی صفر خواهد بود. مولفه دوم هد اصطکاکی (KQ^2) است که در واقع بیانگر توان مورد نیاز جهت غلبه بر تلفات ناشی از عبور سیال از لوله ها، شیرها و زانوها و دیگر اجزای سیستم لوله کشی می باشد. این تلفات کلا وابسته به سرعت عبور سیال بوده و غیر خطی است. با جمع کردن دو منحنی (H_S و KQ^2)، منحنی سیستم (H_R) بدست می آید.

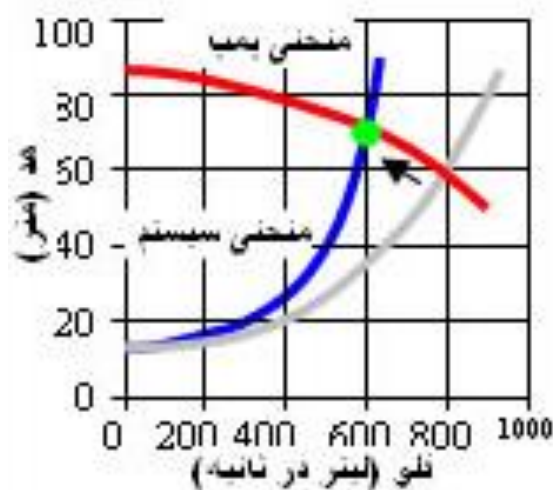
در شکل (3-3) منحنی سیستم و منحنی پمپ با هم نشان داده شده است نقطه کاریک پمپ محل تلاقی منحنی پمپ و منحنی سیستم می باشد. با توجه به این منحنی ها روشن می شود که میزان فلو در این سیستم 800 لیتر در ثانیه و هد 60 متر می باشد. اگر بخواهیم فقط کار را تغییر بدهیم لازم خواهد بود چیزی به سیستم اضافه نماییم. یک روش متداول در اینجا استفاده از شیر خفه کن است. شکل (3-4) تاثیر عملکرد شیر خفه کن در نقطه کار پمپ را مشاهده در واقع شیر اصطکاک مسیر سیال را افزایش داده و باعث افت فلو می گردد. با وجود اینکه با حضور شیر فلو به 60 لیتر در ثانیه کاهش پیدا کرده ولی در توان مصرفی سیستم تغییر محسوسی ایجاد نشده است حال نگاهی دقیق تر به موضوع خواهیم داشت.



شکل 2-3) منحنی سیستم $[H_R = H_s + KQ^2]$ (این منحنی میزان فشار مورد نیاز برای تامین مقدار مشخصی از دبی آمده است) [5]



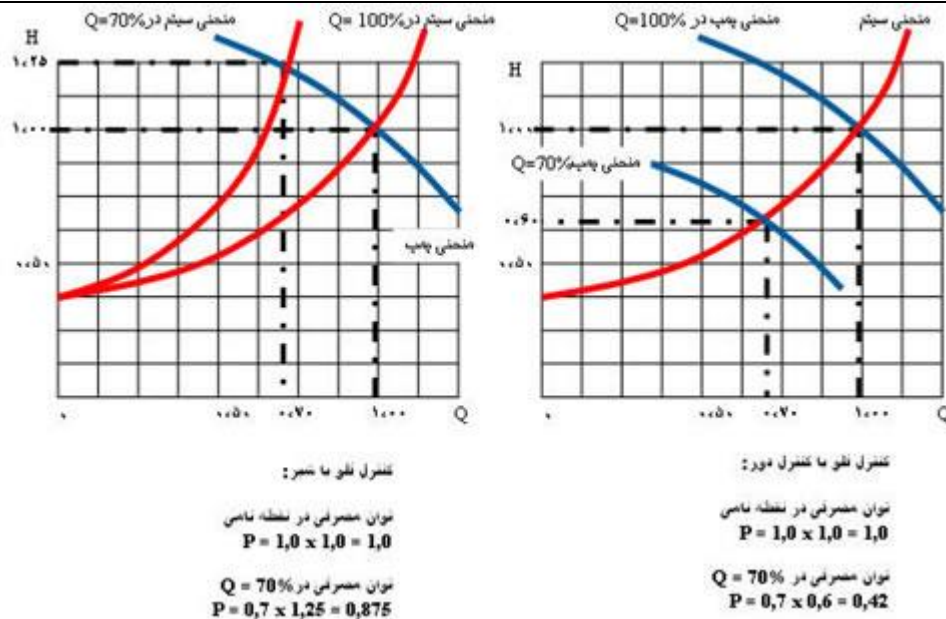
شکل 3-3) تلاقی منحنی سیستم $[H_R]$ و منحنی پمپ $[H_p]$ نقطه کار بدست می آید [4]



شکل 4-3) بستن شیر اختناق و کم کردن دبی (جابجایی محل تلاقی منحنی پمپ و سیستم به سمت چپ (دبی کم تر)) [3]

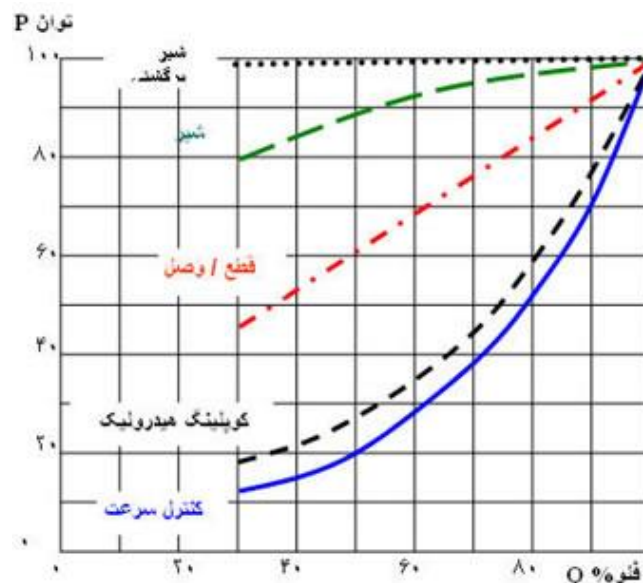
همانطور که در مشاهده می کنید برای دستیابی به فلو مورد نظر از دو روش کنترل فلو با استفاده شیر و کنترل با استفاده از درایو استفاده شده است. در روش کنترل فلو با شیر میزان توان معرفی 875٪ درصد در کنترل فلو با درایو توان معرفی 43٪ درصد توان نامی می باشد. برای مثال اگر توان نامی پمپ 100kW باشد. تفاوت توان مصرفی دو روش معرفی برابر خواهد بود:

$$(100kw \times 0/875) - (100kw \times 0/43) = 45/5kw$$



شکل 5-3) مقایسه توان در دو حالت الف) تکنولوژی VSD (منحنی سمت راست) و ب) شیر اختناق (منحنی سمت چپ) [2]

هر چند که در سیستمهایی که هد استاتیک بالا ئی دارند با تغییر دور، راندمان پمپ هم به میزان زیادی تغییر می کند، ولی مزایای دیگر درایو استفاده از آن را بخوبی توجیه می کند. برای مثال میزان فشار هیدرولیک وارد شده به پره های پمپ سانتریفوژ با مجذور سرعت افزایش می یابد.



شکل 6-3) میزان مصرف انرژی در یک پمپ در پنج حالت: با استفاده از شیر برگشتی، با استفاده از شیر خفه کن، با قطع و وصل پمپ، با استفاده از کوپلینگ هیدرولیک، با استفاده از کنترل کننده دور موتور [5]

این نیروها به بیرینگهای پمپ اعمال شده و عمر مفید آنها را کاهش خواهد داد. خاطر نشان میشود که عمر بیرینگها بطور معکوس با توان هفتم سرعت متناسب است. از سوی دیگر با کاهش دور نويز و نوسانات سیستم نیز کاهش پیدا می کند. در شکل (3-6)، میزان مصرف انرژی در یک پمپ در پنج حالت با استفاده از :

- شیر برگشتی¹ یا گذرگاه فرعی (بای پاس)

- با استفاده از شیر خفه کن²

- با استفاده از قطع و وصل پمپ³

- با استفاده از کوپلینگ هیدرولیک⁴

- و با استفاده از کنترل کننده دور موتور⁵

نمایش داده شده است. با توجه به این شکل تاثیر قابل توجه کنترل کننده دور موتور در کاهش انرژی مصرفی، نسبت به دیگر روشها، مشاهده می شود. در روش شیر برگشتی (گذرگاه فرعی) متناسب با نیاز مقداری از دبی خروجی پمپ به ورودی آن عودت داده می شود. بدیهی است که در این حالت توان مصرفی برای هر دبی خروجی ثابت خواهد بود. امروزه در کشورهای پیشرفته بعنوان یک برخورد اولیه در کاهش سریع مصرف انرژی، مجهز نمودن این نوع فنها و پمپها به درایو می باشد. نکاتی که باید در طراحی سیستمهای پمپ مورد توجه قرار گیرند عبارتند از: سیستم را بزرگ انتخاب نکنید. حتی اگر بعدها نیاز به توسعه پیدا کردید. باز مطلوب آن است که بعدا کنار سیستم موجود پمپ بیشتری اضافه کنید. توجه کنید که هزینه های خرید پمپ در مقایسه با هزینه های انرژی آن در طول عمر پمپ ناچیز است. پس پمپهای با راندمان بالا را استفاده کنید. از درایو برای کنترل فلو استفاده کنید، بجای استفاده از یک پمپ بزرگ از تعدادی پمپ کوچک بطوریکه مجموع آنها ظرفیت مورد نیاز را تامین نماید، استفاده کنید. بدین ترتیب می توانید در صورت عدم نیاز به ظرفیت اضافی آن را از مدار خارج کنید.

¹ By pass valve

² Throttling valve

³ On and off control

⁴ Hydraulic coupling

⁵ Variable speed control

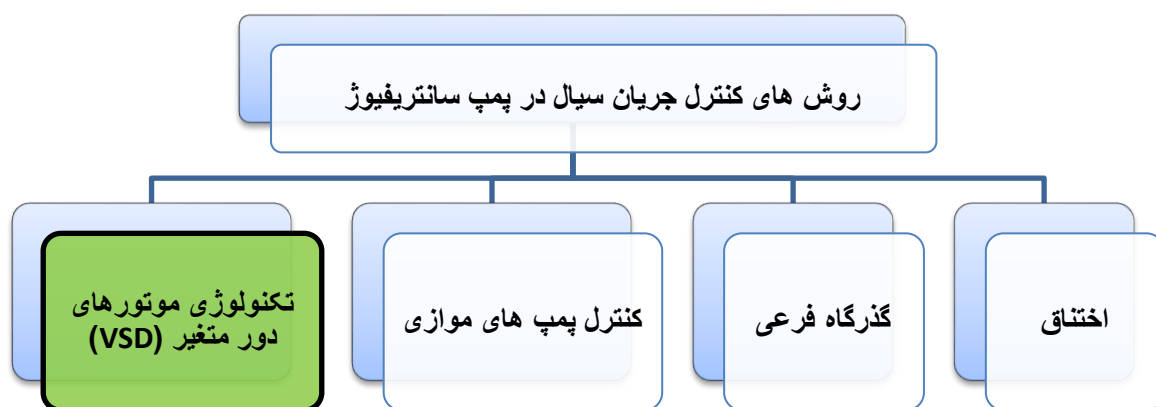
فصل 4:

مدلسازی

1-4- مقدمه

برای یک پمپ با سائیز بزرگتر از معمول (oversized) که با بار کم کار می کند کنترل دور متغیر، روشی برای صرفه جویی در مصرف انرژی است. تخمین میزان انرژی ذخیره شده با استفاده از قوانین تشابه (توان یا انرژی ورودی به پمپ با توان سوم دبی جریان تغییر می کند) در میان کاربران پمپ محبوب است. با این وجود اگر لازم باشد پمپ فشار سیال را به اندازه ای افزایش دهد که علاوه بر غلبه بر مقاومت اصطکاکی ($K \times Q^2$) در سیستم لوله کشی بر هد استاتیک (H_s) غلبه کند این تخمین خطا دارد. این پژوهش، روشی برای تخمین میزان انرژی صرفه جویی شده توسط پمپ دور متغیر ارائه می کند. این روش برای یک پمپ تجاری برند آپکس¹ به کار برده شد.

در صنایع نفت و گاز و پتروشیمی و صنعت آب و فاضلاب، جهت کنترل جریان سیال در پمپ های سانتریفیوژ، شیوه های مختلفی مطابق نمودار زیر وجود دارد. در میان این روش ها روش اختناق بسیار پرکاربرد است ولیکن موجب هدر رفت انرژی می شود. روش کنترل جریان سیال به کمک تکنولوژی VSD نسبتاً جدید است و هدر رفت انرژی را به حداقل ممکن می رساند.

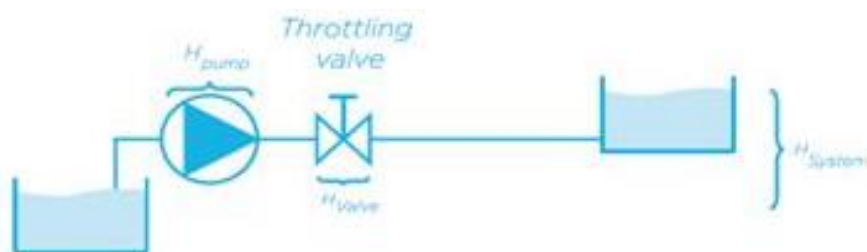


شکل 1-4) تکنولوژی های مختلف کنترل جریان سیال یک پمپ (تنظیم دبی سیال) [6]

شماتیک هر کدام از 4 روش ارائه شده در شکل (4-1) در ادامه نشان داده شده است. در میان این

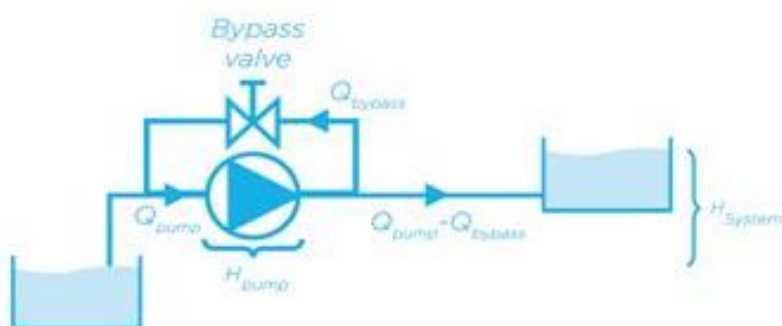
¹ Apex

روش ها، روش چهارم (تنظیم جریان به کمک درایور دور متغیر (VSD)) جدید تر بوده و هدر رفت انرژی بسیار کمتری دارد. لازم بذکر است روش VSD زمانی مقرون بصرفه است که در اغلب ساعتهای کارکرد پمپ، دبی مورد نیاز نزدیک دبی طراحی پمپ نباشد یا پمپ oversize باشد.



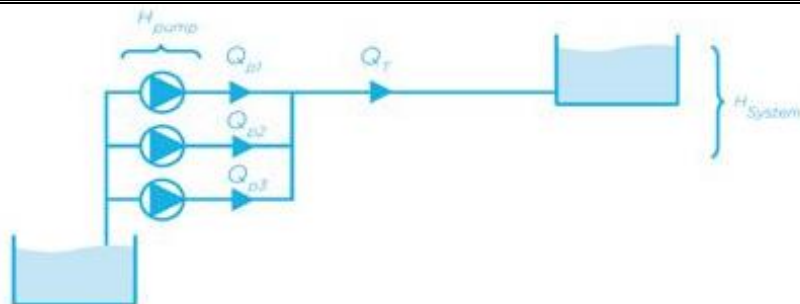
Throttling control

شکل 2-4) کنترل جریان سیال پمپ به روش اختناق در مسیر خروجی پمپ و با بستن نسبی شیر جریان سیال [7]



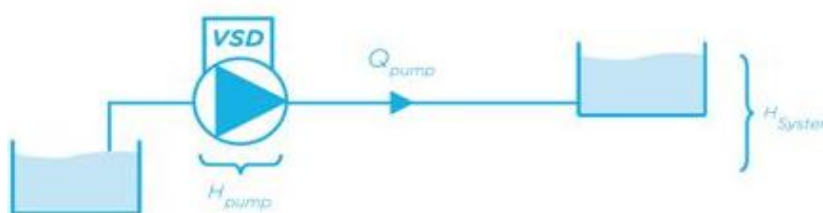
Bypass control

شکل 3-4) کنترل جریان سیال پمپ به روش گذرگاه فرعی در مسیر خروجی پمپ و با باز کردن نسبی شیر بایپاس [4]



Parallel Pump control

شکل 4-4) کنترل جریان سیال پمپ به روش بکارگیری پمپ های موازی با ظرفیت کم [9]



VSD control

شکل 4-5) کنترل جریان سیال به روش تغییر دور پمپ و تغییر جریان پمپ (تغییر دور پمپ به کمک تکنولوژی VSD)
پمپ در بسیاری از فرآیندهای صنعتی بدلائیل مختلفی از جمله افزایش ظرفیت تولید و یا بخاطر حاشیه امنیت در طراحی oversize انتخاب میگردد. در این شرایط به کارگیری VSD اثر قابل ملاحظه ای در کاهش مصرف انرژی دارد.

4-2- تکنولوژی VSD یا درایو دور متغیر¹

4-2-1- کاربردهای درایو دور متغیر

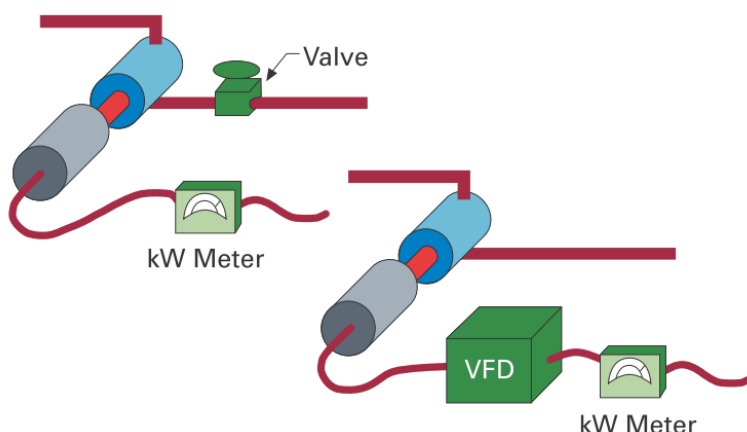
در ابتدای ظهور فناوری دور متغیر، کاربرد آن در کنترل فرایند تولید الیاف مصنوعی، میله های فولادی و فویل آلومینیومی بود. از آن جا که درایوهای دور متغیر باعث بهبود عملکرد فرآیند و کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری می شدند جایگزین مجموعه ژنراتور-موتور و درایو جریان مستقیم شدند.

¹ Variable frequency drive (VFD)

هنگامی که بحران انرژی در اوایل دهه 1970 رخ داد، صرفه‌جویی در مصرف انرژی به یک هدف مهم تبدیل شد و استفاده از درایو فرکانس متغیر در سیستم‌های پمپاژ در صنایع نفت و گاز و در نهایت در سیستم‌های گرمایش و تهویه مطبوع¹ به سرعت فراگیر شد.

4-2-2- مقایسه درایو دور متغیر با دستگاه اختناق

در بسیاری از کاربردهای جریان، از یک دستگاه اختناق مکانیکی (مانند شیر) برای محدود کردن دبی جریان استفاده می‌شود. اگرچه این دستگاه یک وسیله مؤثر برای کنترل جریان است، اما انرژی مکانیکی و الکتریکی زیادی مصرف می‌کند. شکل (4-6) نمایانگر سیستم پمپاژ با استفاده از شیر اختناق مکانیکی و همان سیستم با استفاده از درایو فرکانس متغیر (VSD) است.

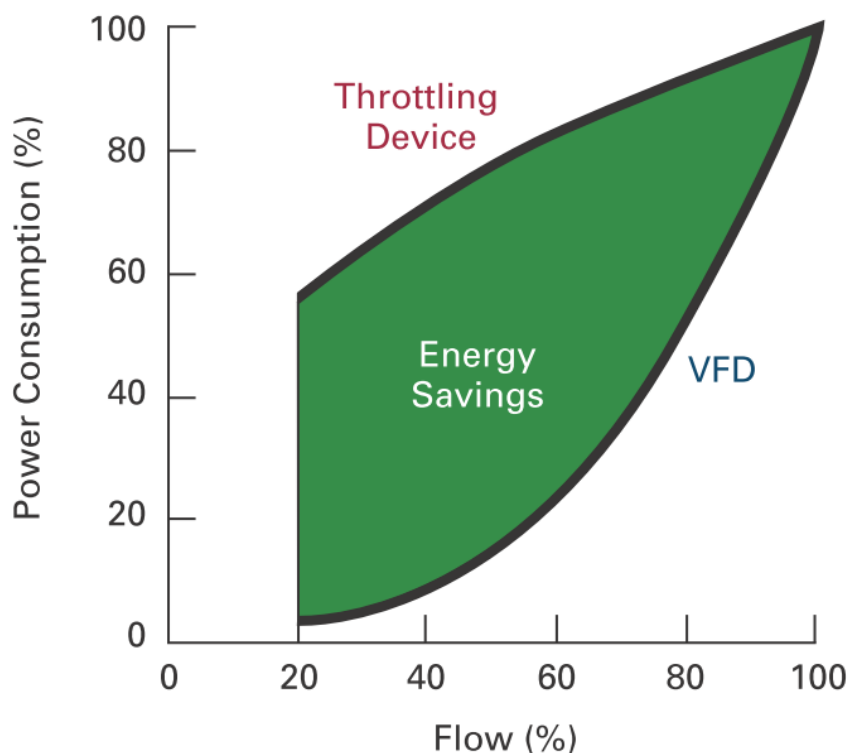


شکل (4-6) دستگاه اختناق مکانیکی در مقابل درایو فرکانس متغیر [3]

در شکل (4-7) منحنی بالایی نشان‌دهنده مصرف انرژی در هنگام استفاده از دستگاه اختناق جهت کنترل جریان است. در حالی که منحنی پایینی نشان‌دهنده مصرف انرژی در هنگام استفاده از درایو فرکانس متغیر است. از آنجا که درایو فرکانس متغیر، فرکانس موتور جریان متناوب را تغییر می‌دهد سرعت، جریان و مصرف انرژی در سیستم کاهش می‌یابد. ناحیه سبزرنگ میزان انرژی صرفه‌جویی شده را نشان می‌دهد.

¹ Heating, ventilation and air conditioning (HVAC)

همانطور که در شکل (4-7) مشاهده می‌کنید زمانی که دبی جریان پمپاژ شده از دبی طراحی پمپ، خیلی کمتر باشد صرفه جویی بسیار زیادی حاصل می‌شود (به عنوان مثال، زمانی که به دبی 20٪ دبی طراحی پمپ نیاز است استفاده از VSD نسبت به روش اختناق، سبب 50٪ صرفه جویی در مصرف انرژی می‌شود)



شکل (4-7) میزان انرژی صرفه‌جویی شده توسط درایو فرکانس متغیر (در مقایسه با شیر اختناق) برای کنترل دبی جریان [7]

4-3- تئوری درایو دور متغیر

پمپ از طریق انرژی‌ای که از یک موتور یا ماشین می‌گیرد فشار سیال را افزایش می‌دهد. پمپ‌های تجاری در اندازه‌ها، طرح‌ها و ظرفیت‌های متنوعی موجود هستند. عملکرد هر پمپ با استفاده از سه پارامتر (فشار-توان-راندمان) تعیین می‌شود: افزایش انرژی سیال یا هد پمپ، انرژی مورد نیاز برای کار پمپ و راندمان پمپ. این سه پارامتر با دبی جریان سیال تغییر می‌کنند. تست پمپ، چگونگی تغییر این سه پارامتر با دبی جریان را آشکار می‌کند. نتایج تست معمولاً برای ترسیم منحنی عملکرد پمپ استفاده می‌شود. واضح است که عملکرد پمپ سانتریفیوژ تحت تاثیر سرعت دورانی (دور) پمپ قرار دارد.

به منظور شبیه سازی و بهینه سازی، نه تنها مدلی از منحنی عملکرد پمپ مورد نیاز است بلکه مدلی از چگونگی تغییرات منحنی عملکرد پمپ با تغییر دور پمپ نیز مورد نیاز است. واضح است که چنین مدل هایی را می توان با انجام تست های عملکردی پمپ در دورهای مختلف پمپ به دست آورد اما این آزمون ها گران قیمت و پردردسر هستند. بنابراین معمولاً فرض می شود قوانین تشابه پمپ که در زیر آورده شده می توانند به کار برده شوند:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (4-1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (4-2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (4-3)$$

Q, N, H و P به ترتیب دبی جریان، دور یا سرعت پمپ، هد و توان ورودی هستند.

تعیین مشخصات یک پمپ با سایز بزرگتر از معمول یک روش عملی استاندارد در صنعت است که امکان گسترش سیستم در آینده را فراهم کرده و نیز تلفات پیش بینی نشده را جبران می کند. پمپ با سایز بزرگتر از معمول ممکن است جریان با دبی خیلی بالایی تحویل دهد، در این صورت استفاده از یک شیر اختناق برای کاهش دبی جریان ضروری به نظر میرسد. اما نتایج نشان می دهد که با این کار بهره وری انرژی (راندمان انرژی) کاهش می یابد. یک روش کارآمدتر برای کاهش دبی جریان، کاهش دور پمپ است. یکی از کاربردهای قوانین تشابه رابطه زیر است:

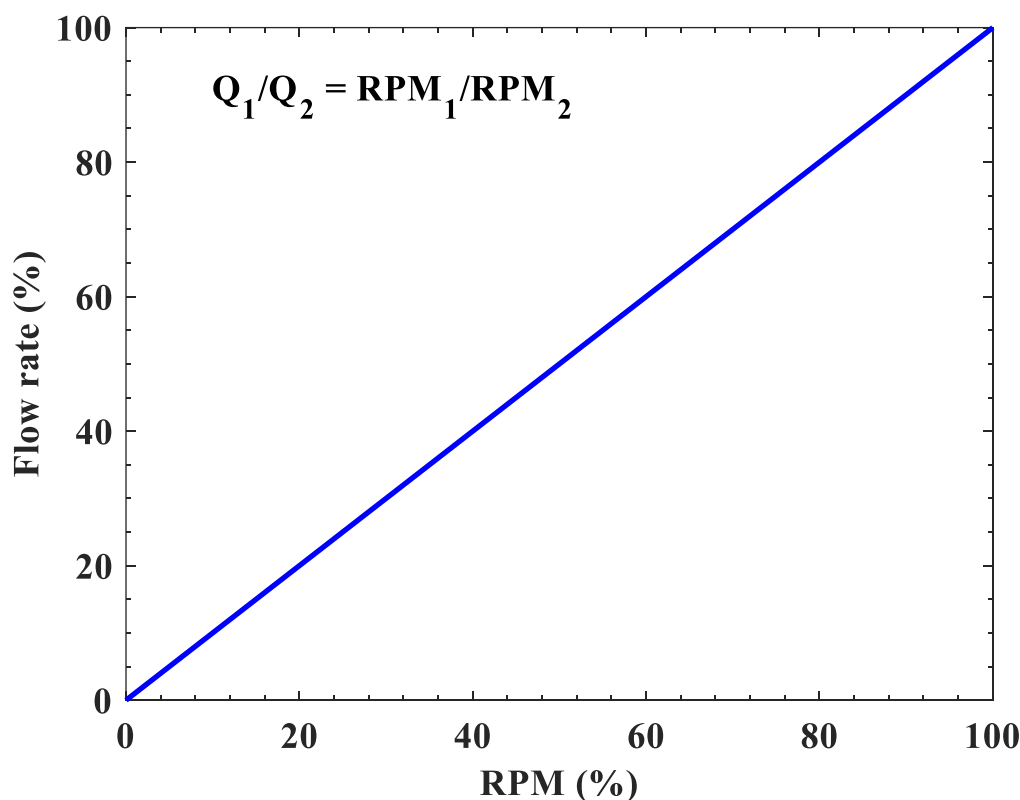
$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^3 \quad (4-4)$$

استفاده از معادله (4-4) برای تخمین میزان انرژی صرفه جویی شده حاصل از کنترل دور متغیر پمپ سانتریفیوژ تنها زمانی درست است که مایع پمپ شده تنها بر مقاومت اصطکاکی در سیستم لوله کشی غلبه کند. هنگامی که یک هد استاتیک (H_s) وجود دارد استفاده از معادله (4-4) منجر به تخمین بیش از اندازه انرژی ذخیره شده می شود [۲۵]. از آنجایی که نصب کنترل دور متغیر برای پمپها

نیازمند سرمایه‌گذاری قابل توجهی است تکیه بر معادله (4-4) برای سرمایه‌گذاری در این مورد، بی‌احتیاطی است. تلاش‌هایی در راستای تخمین بهتر انرژی ورودی به پمپ دورمتغیر انجام شده است [۲۶-۲۸]. با وجود همه این تلاش‌ها، معادله (4-4) همچنان در میان مهندسان عملی محبوب است. یکی از دلایل این محبوبیت عدم وجود یک فرمول ساده مانند معادله (4-4) است.

قوانین تشابه¹ می‌توانند عملکرد دستگاه‌های سانتریفیوژ مانند پمپ را دورهای مختلف تعیین کنند. عملکرد این دستگاه‌ها به صورت الزامات بار و صرفه‌جویی در مصرف انرژی تعریف می‌شود. در شکل‌های زیر سه قانون تشابه نشان داده شده است.

- دبی حجمی به‌طور خطی با سرعت تغییر می‌کند. اگر سرعت تا 50 درصد کاهش یابد جریان تا 50 درصد کم می‌شود (شکل (4-8))

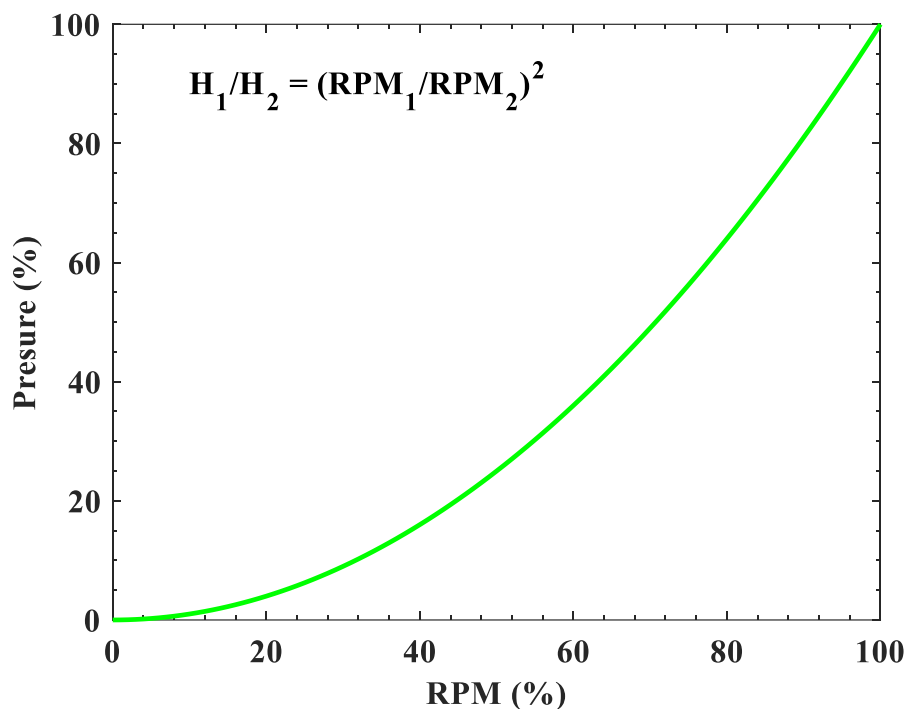


شکل 4-8) قوانین تشابه جهت تعیین عملکرد پمپ سانتریفیوژ (با تغییر دور پمپ دبی بصورت خطی تغییر میکند) [2]

¹ Affinity laws

- فشار یا هد با توان دوم سرعت تغییر می کند. اگر سرعت تا 50 درصد کاهش یابد فشار تا 25

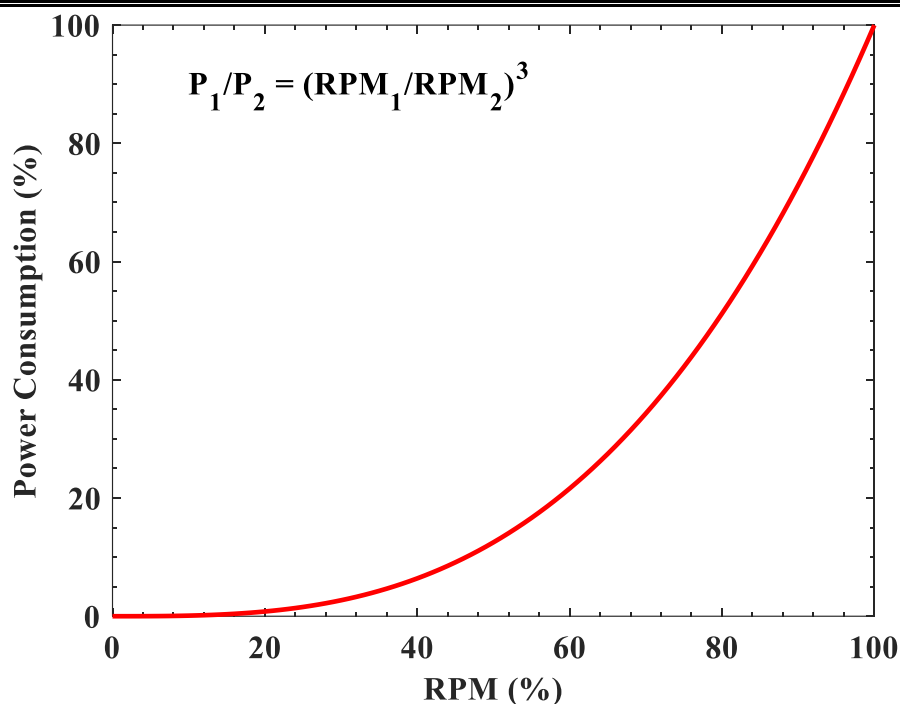
درصد کم می شود (شکل (4-9)).



شکل (4-9) قوانین تشابه جهت تعیین عملکرد پمپ سانتریفیوژ (با تغییر دور پمپ هد با توان 2 تغییر میکند) [4]

- مصرف توان یا انرژی با توان سوم سرعت تغییر می کند. اگر سرعت تا 50 درصد کاهش یابد

مصرف توان تا 12/5 درصد کم می شود (شکل (4-10)).



شکل 4-10) قوانین تشابه جهت تعیین عملکرد پمپ سانتریفیوژ (با تغییر دور پمپ توان مصرفی با توان 3 تغییر میکند) [6]

4-4- تعیین مشخصات سیستم پمپاژ

تعیین منحنی سیستم (این منحنی نشان می‌دهد چه دبی جریانی یک فشار مشخص تولید میکند) جهت انتخاب پمپ مناسب برای یک سیستم بسیار مهم است. برای تعیین دقیق منحنی سیستم دو عامل مهم باید مشخص شوند:

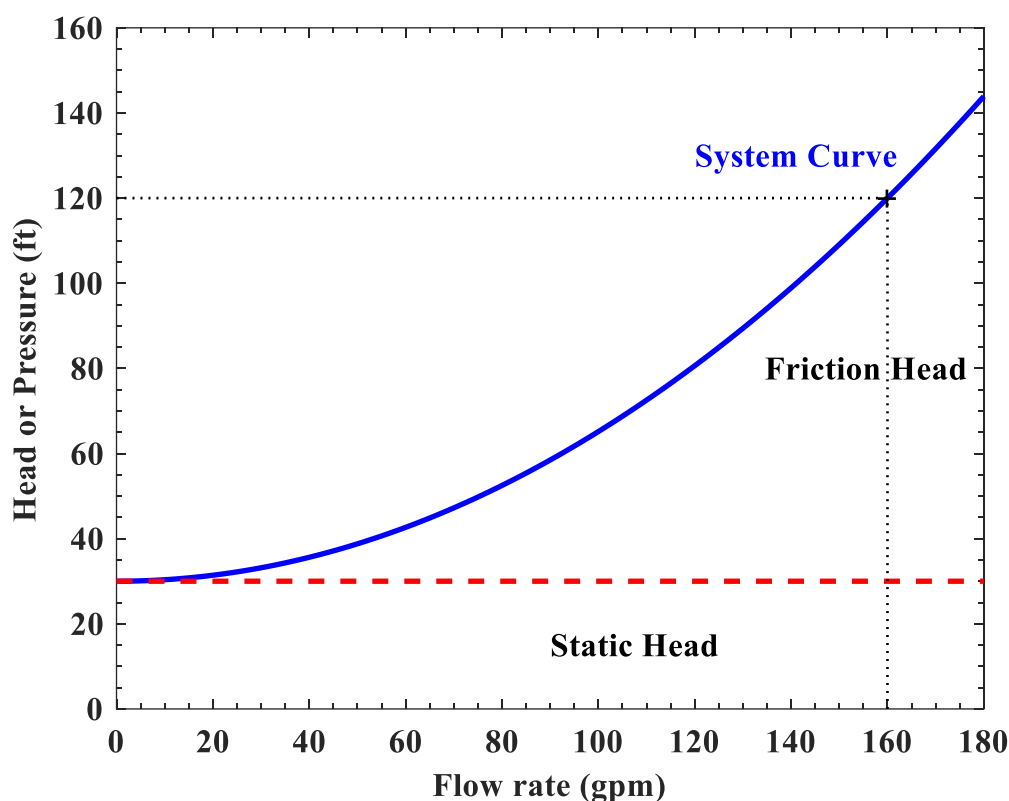
هد استاتیک یا لیفت¹ - ارتفاعی که سیال باید از سطح منبع خروجی بالا برده شود.

هد اصطکاک² - انرژی موردنیاز برای غلبه بر تلفات که ناشی از جریان سیال در خطوط لوله کشی،

شیرها، خم‌ها و دیگر دستگاه‌های موجود در خطوط لوله کشی می‌باشد. این تلفات کاملاً وابسته به جریان و غیرخطی هستند.

¹ Static head or lift

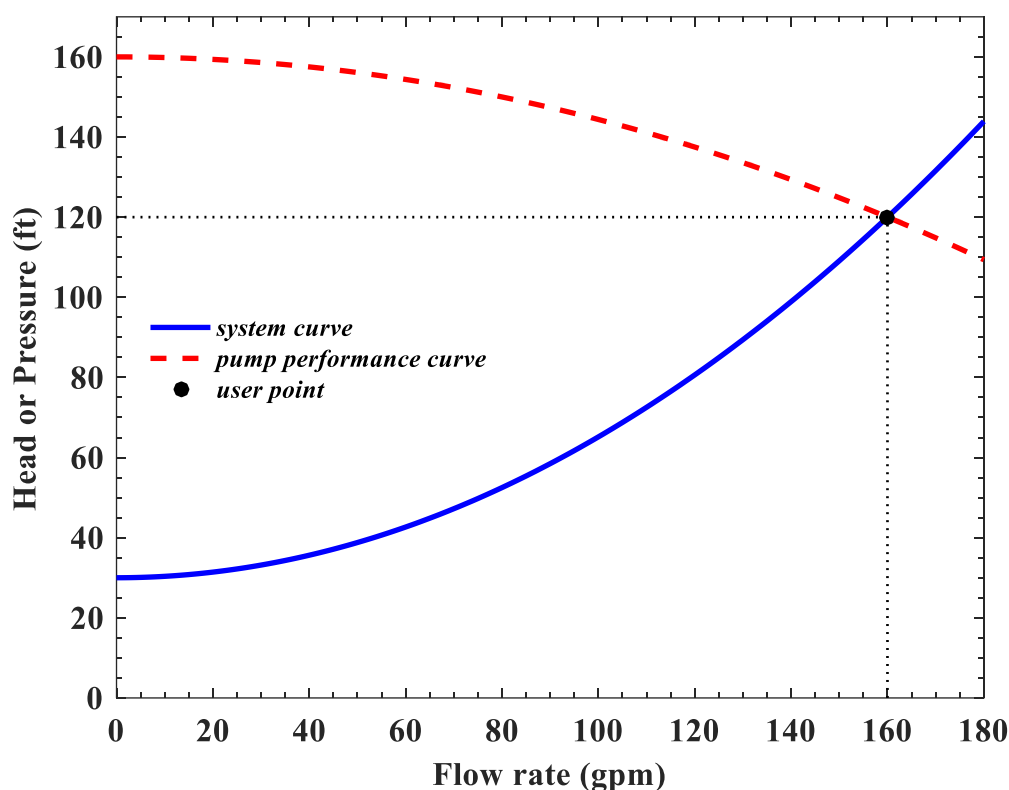
² Friction head



شکل (11-4) دو عامل مهم در تعیین منحنی سیستم (هداستاتیک و افت فشار اصطکاکی) [5]

در شکل شکل (11-4) هد استاتیک، هد اصطکاک و منحنی سیستم برای یک سیستم پمپاژ معمولی نشان داده شده است. در این مثال، حداکثر دبی جریان مورد نیاز 160 گالن بر دقیقه است. این اطلاعات به انتخاب پمپ مورد نیاز برای تامین حداکثر دبی مورد نیاز کمک میکند. براساس منحنی نشان داده شده در شکل (11-4) پمپ باید حداقل 120 فوت فشار تامین کند.

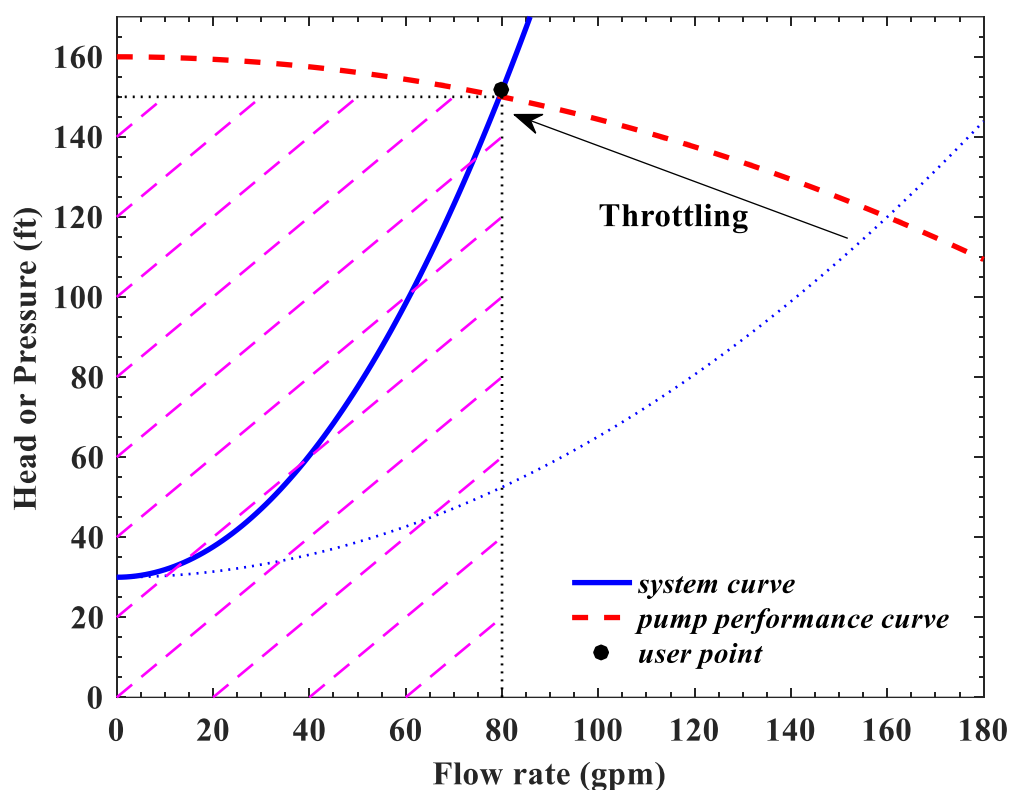
در شکل (11-4) منحنی سیستم و منحنی عملکرد پمپ در نقطه عملیاتی مطلوب (فشار 120 فوت و دبی 160 گالن بر دقیقه) یکدیگر را قطع می کنند. سیستم دارای یک نقطه عملیاتی واحد خواهد بود مگر این که دستگاهی به سیستم اضافه شود، با این وجود برای تولید حداکثر جریان به ندرت به پمپ دیگری نیاز است.



شکل (4-12) ترکیب منحنی‌های سیستم و پمپ [6]

4-5- کاربردهای دستگاه اختناق در یک سیستم پمپاژ

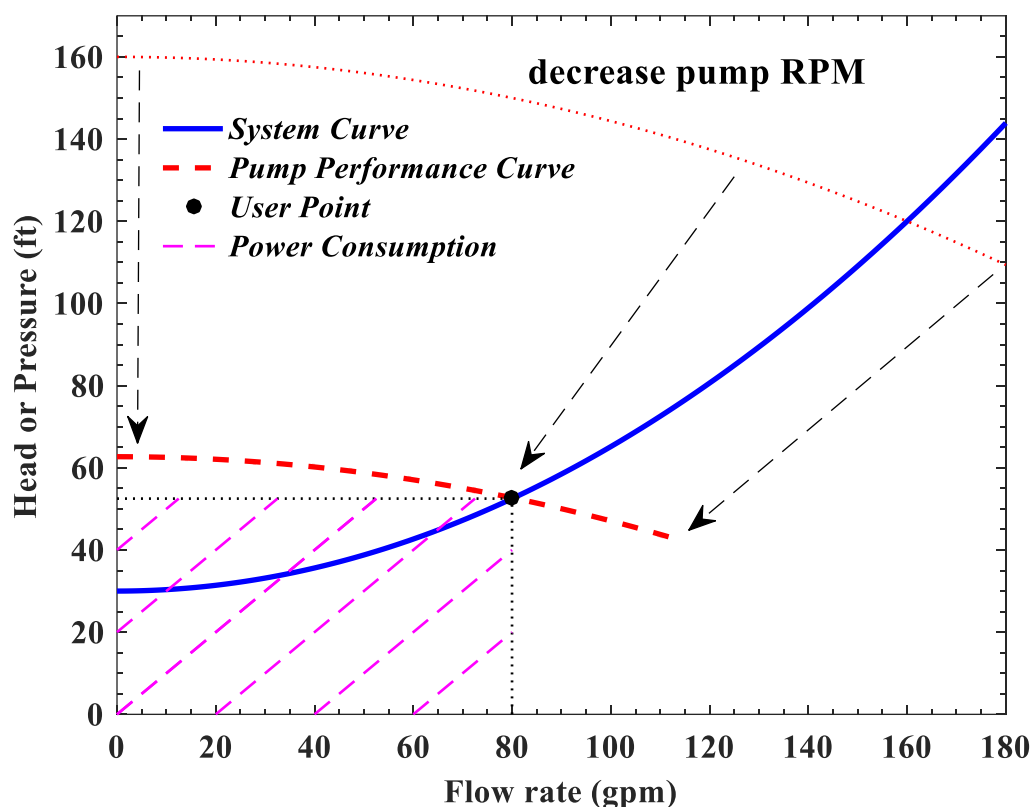
در سیستم پمپاژ غالباً از دستگاه اختناق به عنوان روشی مکانیکی برای کاهش دبی جریان استفاده می‌شود. مطابق شکل (4-13) استفاده از یک دستگاه اختناق در سیستم، منحنی سیستم را تغییر می‌دهد و دبی جریان کم می‌شود اما منحنی پمپ تغییر نمی‌کند و پمپ با حداکثر سرعت به کار خود ادامه می‌دهد. این امر منجر به تنش مکانیکی - فشار و دمای بیش از حد- بر روی پمپ می‌شود که می‌تواند باعث خرابی زودرس آب‌بندها یا یاتاقان‌ها شود. مهم‌تر این‌که، دستگاه اختناق مقدار زیادی انرژی مصرف می‌کند. انرژی مصرفی با ناحیه صورتی رنگ در شکل (4-13) نشان داده شده‌است.



شکل 13-4) تغییر منحنی سیستم بعد از بکارگیری دستگاه اختناق مکانیکی جهت رسیدن به دبی $Q=80$ [7]

4-6- کاربرد درایو دور متغیر در سیستم پمپاژ

استفاده از درایو دور متغیر در سیستم پمپاژ باعث کنترل سرعت پمپ به صورت الکتریکی می‌شود، برای این کار درایو دور متغیر از انرژی‌ای معادل انرژی مورد نیاز برای تولید جریان با دبی مشخص استفاده می‌کند. در واقع مشابه این است که از یک پمپ جدید با پروانه کوچکتر استفاده کنیم. شکل 7 منحنی پمپ جدید و انرژی مصرفی با استفاده از این روش را نشان می‌دهد. همچنین استفاده از درایو دور متغیر باعث کاهش فشار می‌شود که به کاهش تنش‌های مکانیکی تولیدشده توسط دستگاه اختناق کمک می‌کند.



شکل (4-14) تغییر منحنی پمپ با کاهش دور پمپ توسط VSD جهت رسیدن به دبی $Q=80$ gpm [8]

با مقایسه دو نمودار شکل (4-13) و شکل (4-14) می‌توان دریافت انرژی مصرفی پمپ جهت تامین دبی $Q=80$ gpm توسط درایور VSD پایین تر از بکارگیری دستگاه اختناق است و در واقع با کاهش دور پمپ می‌توان در انرژی مصرفی پمپ صرفه جویی چشمگیری انجام داد. با مقایسه شکل (4-13) و شکل (4-14) می‌توان دریافت با بکارگیری VSD در مقایسه با دستگاه اختناق میزان 65٪ صرفه جویی در مصرف انرژی خواهیم داشت. (مساحت هاشور خورده صورتی رنگ با مصرف انرژی پمپ متناسب است)

4-7- مدلسازی

پمپ با سایز بزرگتر از معمول ممکن است جریان با دبی خیلی بالایی تحویل دهد، در این صورت استفاده از یک شیر اختناق برای کاهش دبی جریان ضروری به نظر می‌رسد. اما نتایج نشان می‌دهد که با

این کار بهره‌وری انرژی (راندمان انرژی) کاهش می‌یابد. یک روش کارآمدتر برای کاهش دبی جریان، کاهش دور پمپ است. در این پژوهش مدلسازی مصرف انرژی برای دو حالت کنترل دبی سیال به کمک دستگاه شیر اختناق و تکنولوژی کاهش دور پمپ (VSD) ارائه شده است بدین منظور 9 سناریوی مختلف مطابق جدول زیر مورد بررسی قرار گرفت. در این 9 سناریو میزان دبی به 2 روش (VSD و Throtlling) به اندازه ی 50٪ کاهش داده شد و میزان صرفه جویی مصرف انرژی برای زمانی که از VSD استفاده شده است بدست آمد.

1-7-4- فرضیات مدلسازی

مهمترین فرضیات مورد استفاده در مدلسازی به شرح زیر است.

- منحنی سیستم $(H_R = H_S + KQ^2)$ با استفاده از یک تابع درجه دوم تقریب زده شد [29].
- منحنی عملکرد پمپ و راندمان آن با استفاده از یک تابع درجه دوم تقریب زده شد [29].

2-7-4- منحنی سیستم (H_R)

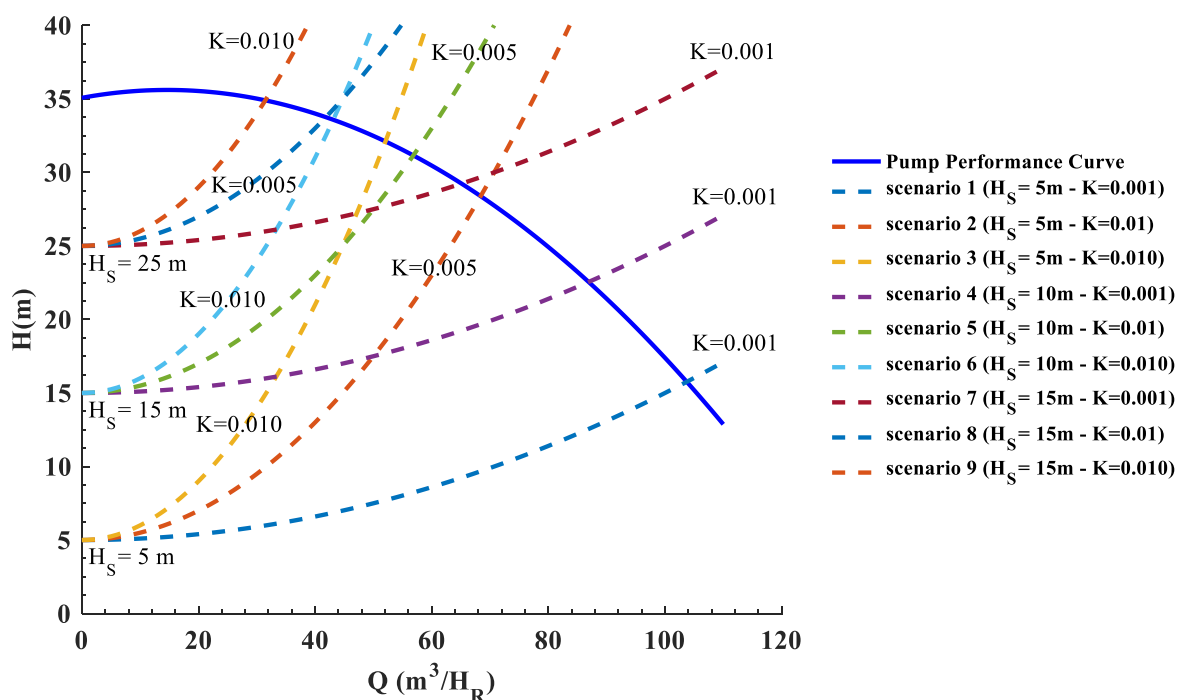
در بحث سیستم های پمپاژ، منحنی سیستم به صورت رابطه (4-5) است. در این رابطه، H_R هد مورد نیاز سیستم جهت تامین دبی Q می‌باشد. ترم H_S ناشی از اختلاف ارتفاع مبدا و مقصد پمپاژ بوده و ترم (KQ^2) هد دینامیک سیستم بدلیل افت فشار اصطکاکی در لوله می‌باشد. بدیهی است هر اندازه قطر لوله جریان کوچکتر و ضریب اصطکاک بزرگتر باشد ضریب K بزرگتر است.

$$H_R = H_S + KQ^2 \quad (4-5)$$

در این 9 سناریو، مشخصات منحنی سیستم (پارامتر H_S و K) با هم تفاوت دارد (بنابراین دبی و فشار مورد نیازی که پمپ می‌بایست تامین کند متفاوت است). مشخصات منحنی سیستم برای 9 سناریو در جدول (4-1) و شکل (4-15) ارائه شده است.

جدول (1-4) 9 سناریوی مختلف برای منحنی سیستم ($H_R = H_S + KQ^2$)

H _R =H _S +KQ ²				سناریو
هد دینامیک (KQ ²)		هد استاتیکی (H _S)		
k=0/001	کوچک	H _S =5 m	کوچک	سناریوی 1
k=0/005	متوسط	H _S =5 m		سناریوی 2
k=0/010	بزرگ	H _S =5 m		سناریوی 3
k=0/001	کوچک	H _S =15 m	متوسط	سناریوی 4
k=0/005	متوسط	H _S =15 m		سناریوی 5
k=0/010	بزرگ	H _S =15 m		سناریوی 6
k=0/001	کوچک	H _S =25 m	بزرگ	سناریوی 7
k=0/005	متوسط	H _S =25 m		سناریوی 8
k=0/010	بزرگ	H _S =25 m		سناریوی 9



شکل (4-15) منحنی سیستم برای هر 9 سناریو به همراه منحنی عملکرد پمپ [2]

در شکل (4-15) منحنی سیستم (خطوط خط چین) برای هر 9 سناریو به همراه منحنی عملکرد

پمپ رسم شده است. همانطور که مشاهده میکنید دبی پمپ و فشار تولیدی پمپ (نقطه کار) برای هر 9

حالت متفاوت است. (محل تقاطع منحنی پمپ و منحنی سیستم نقطه کار نامیده می شود)

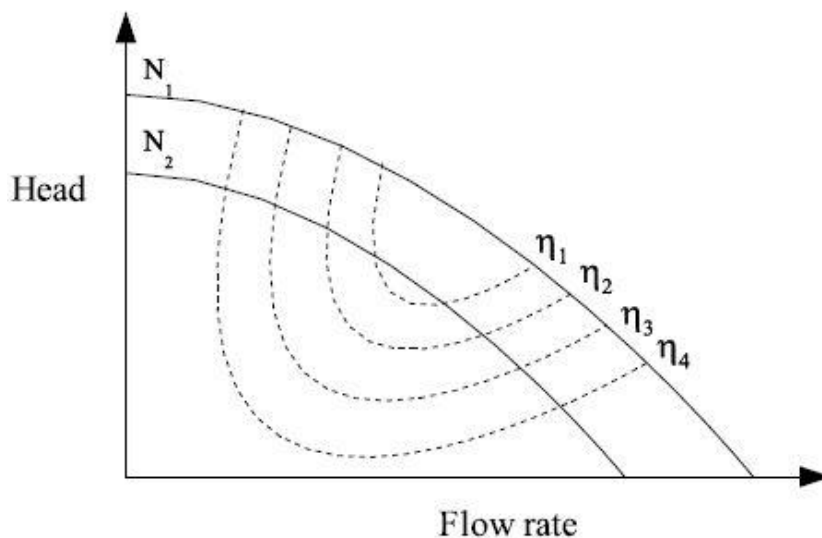
3-7-4- منحنی های عملکرد پمپ

سازندگان، پمپ های خود را به طور گسترده آزمایش کرده و از نتایج آزمایشات برای ترسیم منحنی های عملکرد پمپ استفاده کرده اند. منحنی های عملکرد پمپ شامل منحنی هد، منحنی توان و منحنی راندمان است که به ترتیب تغییرات هد، توان و راندمان پمپ با دبی جریان را نشان می دهند. بیشتر سازندگان فقط منحنی هد در دورهای مختلف پمپ را همراه با خطوط راندمان ثابت ارائه می دهند. معمولاً منحنی توان داده نمی شود زیرا می توان آن را با استفاده از منحنی های هد و راندمان به راحتی رسم کرد. از منحنی عملکردی شرکت پمپ اپکس مطابق مشخصات جدول زیر برای این مطالعه استفاده شده است. Q_{BEP} و H_{BEP} به ترتیب دبی و هد نقطه راندمان بهینه پمپ هستند.

جدول (2-4) پمپ استفاده شده در این مطالعه از برند اپکس

Model	Q_{BEP}	H_{BEP}
TC 100-160	74 m ³ /hr	26.8 m

شکل (4-16) نمودار منحنی عملکرد پمپ ذکر شده در جدول (2-4) را نشان می دهد. در این شکل، می توان دو منحنی هد متفاوت متناسب با دو دور پمپ (N_1 و N_2) را مشاهده کرد. N_1 دور طراحی پمپ است که مقدار آن، 2940 دور بر دقیقه می باشد. N_2 دور کاهش یافته پمپ توسط درایور دور متغیر (VSD) است.



شکل 4-16) منحنی های عملکرد پمپ [3]

همان طور که اولانیسکی و همکاران¹ [۳۰] پیشنهاد داده اند منحنی هد می تواند با یک تابع درجه دوم تقریب زده شود. علاوه بر این، در صورت استفاده از قوانین تشابه منحنی های هد در دورهای مختلف پمپ باید بر روی هم بیفتند بنابراین رابطه بین هد و دبی جریان می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{H}{n^2} = a_1 \left(\frac{Q}{n} \right)^2 + a_2 \left(\frac{Q}{n} \right) + a_3 \quad (4-6)$$

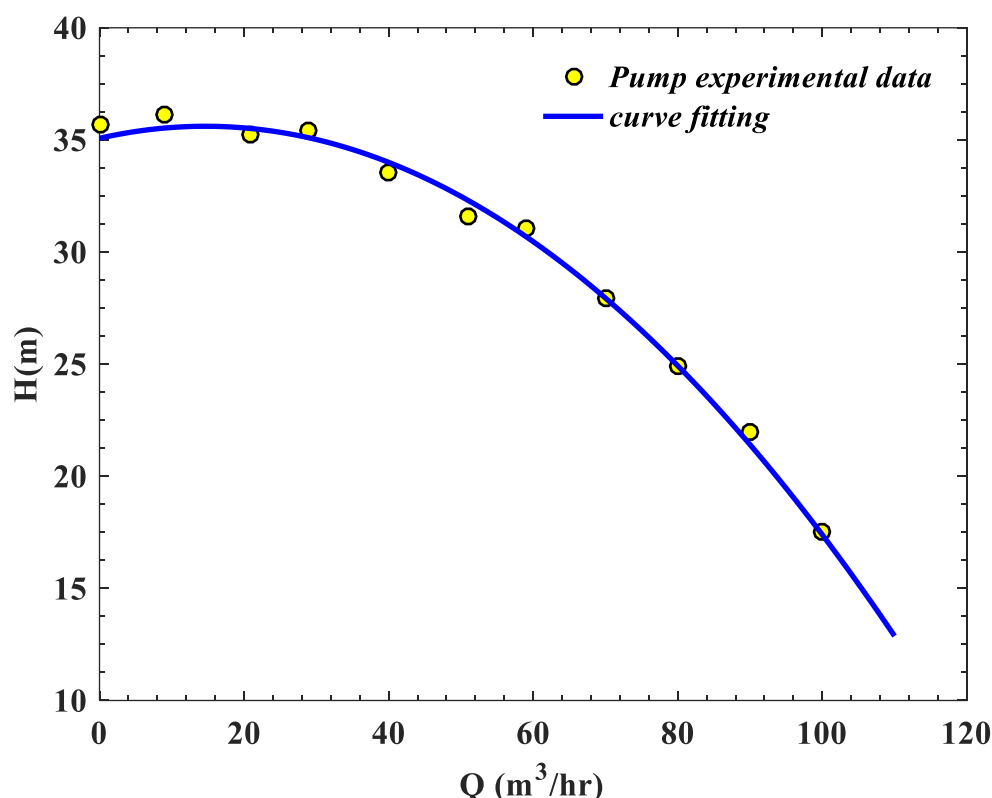
$$n = \frac{N}{N_1} \quad (4-7)$$

برای پمپ ذکر شده (TC 100-160)، نقاط داده ها از منحنی های هد-دبی سازنده ی پمپ، استخراج شده و سپس با استفاده از معادله سهمی برازش (فیت) شدند (شکل 4-17)). ضرایب منحنی های هد – دبی پمپ مذکور همراه با ضرایب همبستگی (r) نشان می دهد.

جدول (4-3) مقادیر ضرایب معادله (4-6) حاصل از برازش منحنی

PUMP	a_1	a_2	a_3	r
TC 100-160	-0.0025	0.0732	35.072	0.999

¹ Ulanicki et al.



شکل 17-4) برازش منحنی‌های هد - دبی برای پمپ [3]

اولانیسکی و همکاران¹ [30] پیشنهاد کردند که راندمان به صورت تابع درجه سوم از دبی جریان تقریب زده شود زیرا راندمان در دبی جریان صفر، باید صفر باشد و در دبی جریان طراحی یا بهینه، راندمان باید ماکزیمم باشد. با توجه به این که محدوده مطلوب راندمان پمپ به راندمان ماکزیمم نزدیک است و در این محدوده تقریب درجه دوم جواب می‌دهد راندمان پمپ با استفاده از تابع درجه دوم زیر تقریب زده شد:

$$\eta = b_1 \left(\frac{Q}{n} \right)^2 + b_2 \left(\frac{Q}{n} \right) + b_3 \quad (4-8)$$

برای یافتن ضرایب منحنی‌های راندمان در معادله (4-8) از روش برازش داده‌ها استفاده می‌شود. نقاط داده‌ها از منحنی راندمان ثابت در دور پمپ N استخراج می‌شوند. نتایج برازش منحنی در شکل (4-4) نشان داده شده است. مطابق شکل می‌توان دید که مدل سهمی، داده‌ها را به خوبی برازش کرده است.

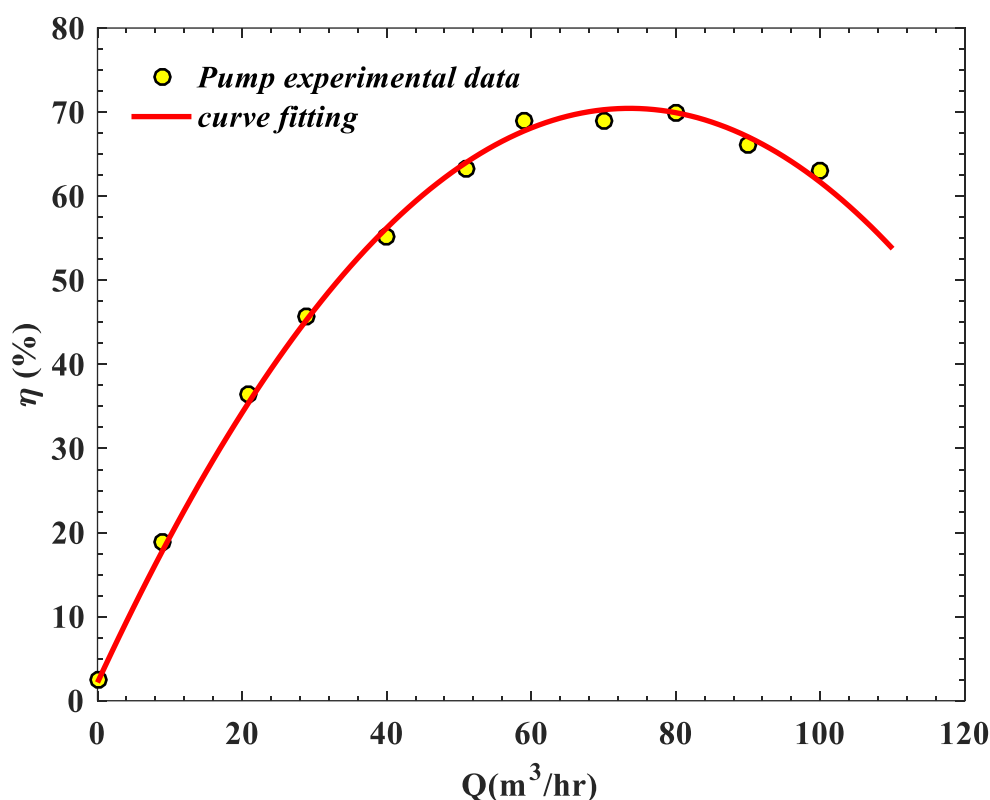
¹ Ulanicki et al.

جدول (4-4) مقادیر b_1 ، b_2 و b_3 را برای پمپ مورد بررسی، همراه با ضرایب همبستگی (r) نشان

می دهد.

جدول (4-4) مقادیر ضرایب معادله (4-8) حاصل از برازش منحنی

PUMP	b_1	b_2	b_3	r
TC 100-160	-0.0126	1.8550	2.1747	0.993

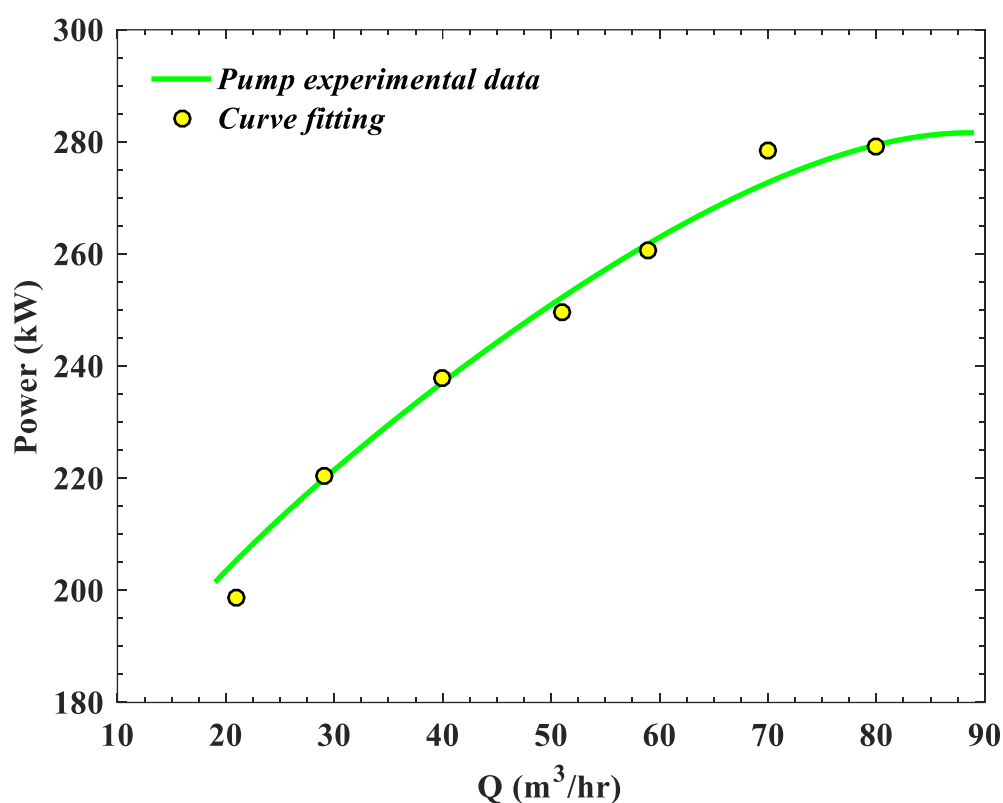


شکل 4-18) برازش منحنی های راندمان پمپ TC 100-160 [5]

توان مورد نیاز پمپاژ مطابق رابطه ی زیر محاسبه میگردد. نمودار مربوط به توان مصرفی پمپ TC

100-160 در شکل (4-19) ارائه شده است.

$$P = \frac{\rho g H Q}{\eta} \quad (4-9)$$



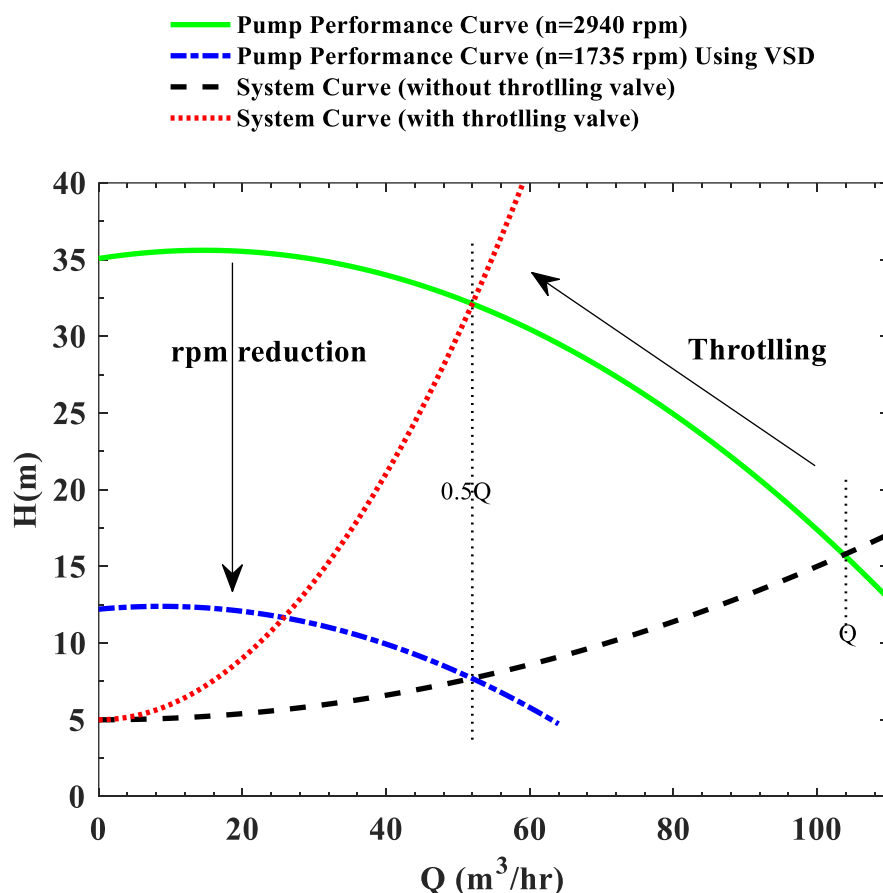
شکل (4-19) برازش منحنی‌های توان پمپ TC 100-160 [4]

4-7-4- کنترل دبی سیال به کمک شیر اختناق و تکنولوژی VSD

4-7-4-1- شکل (4-28) سناریو اول تا نهم

برای سناریوی شماره 1 منحنی سیستم (بدون اختناق و با اختناق) و منحنی پمپ (در دور نامی و

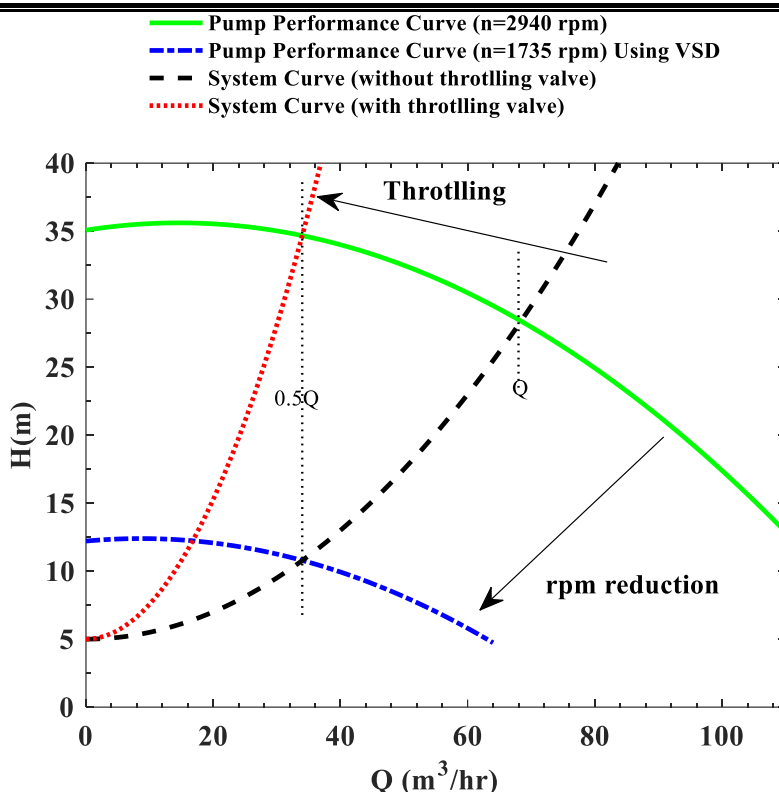
در دور کاهیده شده) در شکل (4-20) ارائه شده است. محور افقی دبی بر حسب m^3/hr و محور عمودی هد بر حسب m می باشد. جهت کاهش دبی به اندازه 50٪، دو روش از منظر مصرف انرژی مورد بررسی قرار گرفت. الف) به کمک بستن شیر اختناق و کاهش دبی ب) به کمک کاهش دور پمپ به کمک VSD



شکل (4-20) کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات $H_s = 5\text{ m} - K = 0.001$ از طریق الف) شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی اول) [7]

- منحنی سیستم بر اساس مشخصات $H_s = 5\text{ m}$ و $K = 0.001$ به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است. با بستن شیر اختناق ضریب K افزایش یافته تا دبی به میزان 50٪ کاهش یابد در این حالت منحنی سیستم جدید به رنگ نقطه چین قرمز در خواهد آمد و فشار تولیدی پمپ از 15 متر به 32 متر افزایش می یابد. میزان توان مصرفی پمپ در شرایط جدید 7.04 Kw بدست آمد.
- زمانیکه از تغییر دور پمپ جهت کاهش دبی به میزان 50٪ استفاده میشود منحنی سیستم تغییر نمیکند و منحنی پمپ با تغییر دور مطابق روابط تشابه اصلاح شد و دوباره رسم گردید. در دور

-
- 1735 rpm منحنی پمپ (خط چین آبی) و منحنی سیستم (خط چین مشکی) در دبی 50٪ با یکدیگر تلاقی می کنند (منحنی پمپ به کمک قوانین تشابه رسم شد) همانطور که مشاهده می کنید هد تولیدی پمپ (در حدود 7.7 m) نسبت به حالت قبل (در حدود 32 m) بسیار کوچکتر است. توان مصرفی پمپ در این حالت 1.61 kw می باشد.
- میزان صرفه جویی در مصرف انرژی زمانیکه از VSD بجای شیر اختناق استفاده میشود در حدود 77.2 % بدست آمد.
- مطابق شکل (4-21) برای سناریوی شماره 2 ($H_s = 5 \text{ m} - K = 0.005$) :
- منحنی سیستم به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است
 - بعد از بستن شیر اختناق و رساندن دبی به 50٪ دبی اولیه، منحنی سیستم به شکل منحنی قرمز نقطه چین در آمده، در این حالت مطابق شکل هد تولیدی پمپ 34.7 m است (محل تلاقی منحنی سبز و قرمز) میزان توان مصرفی پمپ در این حالت بالا و در حدود 6.33 Kw است.
 - با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به 1735 rpm به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین تشابه به شکل منحنی نقطه چین آبی در می آید در این شرایط دبی تولیدی پمپ 50٪ دبی اولیه و هد تولیدی پمپ در حدود 10.8 m (محل تلاقی منحنی آبی و مشکی) است. میزان توان مصرفی پمپ در این حالت پایین بوده (در حدود 1.48 Kw) و میزان صرفه جویی انرژی در این حالت، نسبت به کنترل دبی، با شیر اختناق، 76.6% بدست آمد.

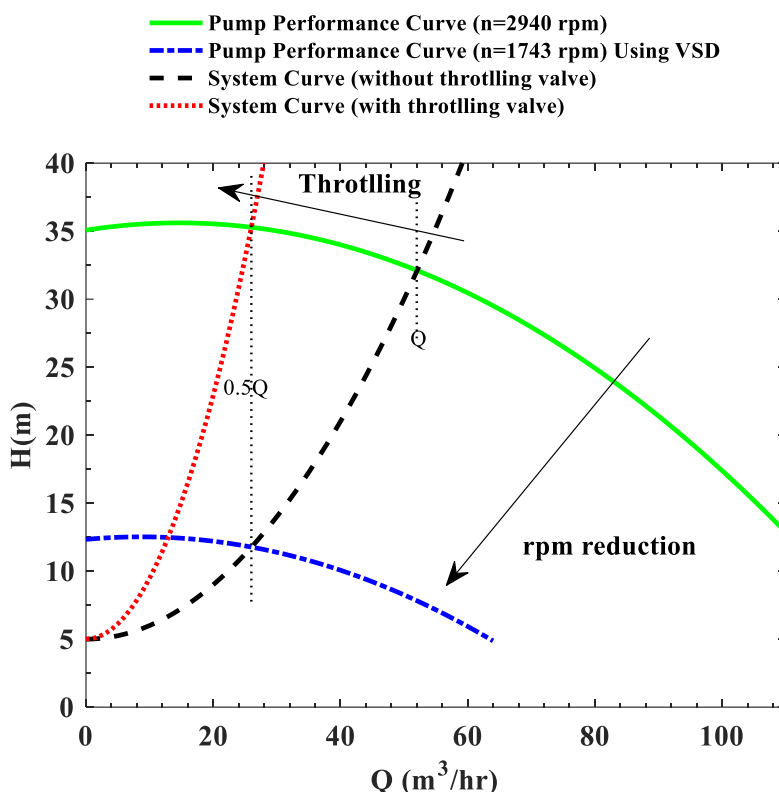


شکل 21-4) کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات $(H_s = 5 \text{ m} - K = 0.005)$ از طریق الف) شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی دوم) [5]

مطابق شکل (21-4) برای سناریوی شماره 3 $(H_s = 5 \text{ m} - K = 0.010)$:

- منحنی سیستم به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است
- بعد از بستن شیر اختناق و رساندن دبی به 50٪ دبی اولیه، منحنی سیستم به شکل منحنی قرمز نقطه چین در آمده، در این حالت مطابق شکل هد تولیدی پمپ 35.3 m است (محل تلاقی منحنی سبز و قرمز) میزان توان مصرفی پمپ در این حالت بالا و در حدود 5.96 kw است.
- با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به 1743 rpm به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین تشابه به شکل منحنی نقطه چین آبی در می آید در این شرایط دبی تولیدی پمپ 50٪ دبی اولیه و هد تولیدی پمپ در حدود 11.8 m (محل تلاقی منحنی آبی و مشکی) است. میزان توان مصرفی پمپ در این حالت پایین بوده (در حدود 1.4 Kw) و میزان صرفه جویی انرژی در این

حالت، نسبت به کنترل دبی، با شیر اختناق، 76.5% بدست آمد.



شکل 22-4) کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات $(H_s = 5 \text{ m} - K = 0.010)$ از طریق الف) شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی سوم) [3]

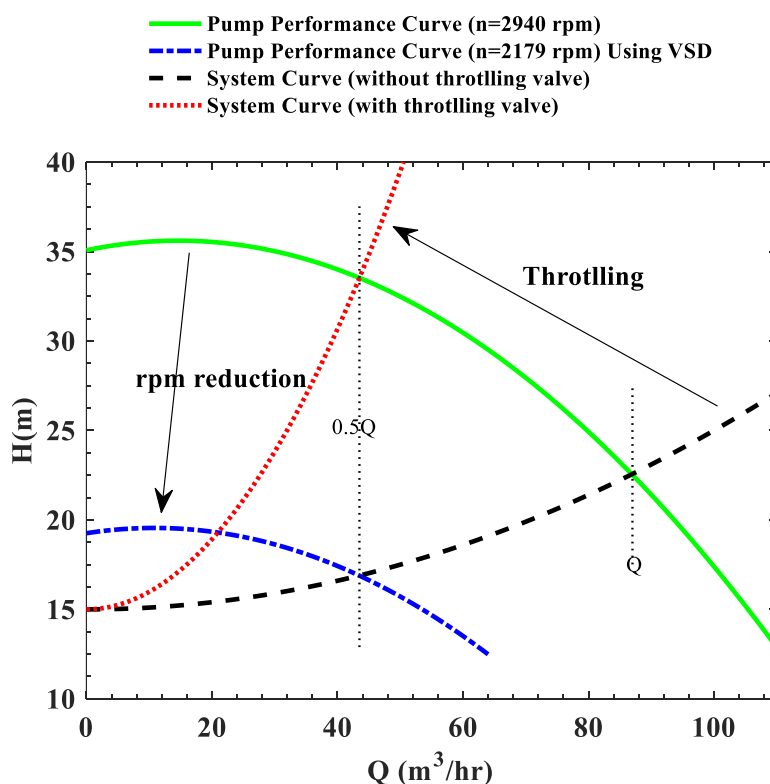
مطابق شکل (4-21) برای سناریوی شماره 4 $(H_s = 15 \text{ m} - K = 0.001)$:

- منحنی سیستم به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است
- بعد از بستن شیر اختناق و رساندن دبی به 50٪ دبی اولیه، منحنی سیستم به شکل منحنی قرمز نقطه چین در آمده، در این حالت مطابق شکل هد تولیدی پمپ 33.5 m است (محل تلاقی منحنی سبز و قرمز) میزان توان مصرفی پمپ در این حالت بالا و در حدود 6.27 kw است.

- با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به 2179 rpm به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین تشابه به شکل منحنی نقطه چین آبی در می آید در این شرایط دبی تولیدی پمپ 50٪ دبی اولیه و هد تولیدی پمپ در حدود 16.9 m (محل تلاقی منحنی آبی و مشکی) است. میزان توان

مصرفی پمپ در این حالت پایین بوده (در حدود 2.96 kw) و میزان صرفه جویی انرژی در این

حالت، نسبت به کنترل دبی، با شیر اختناق، 56.0% بدست آمد.

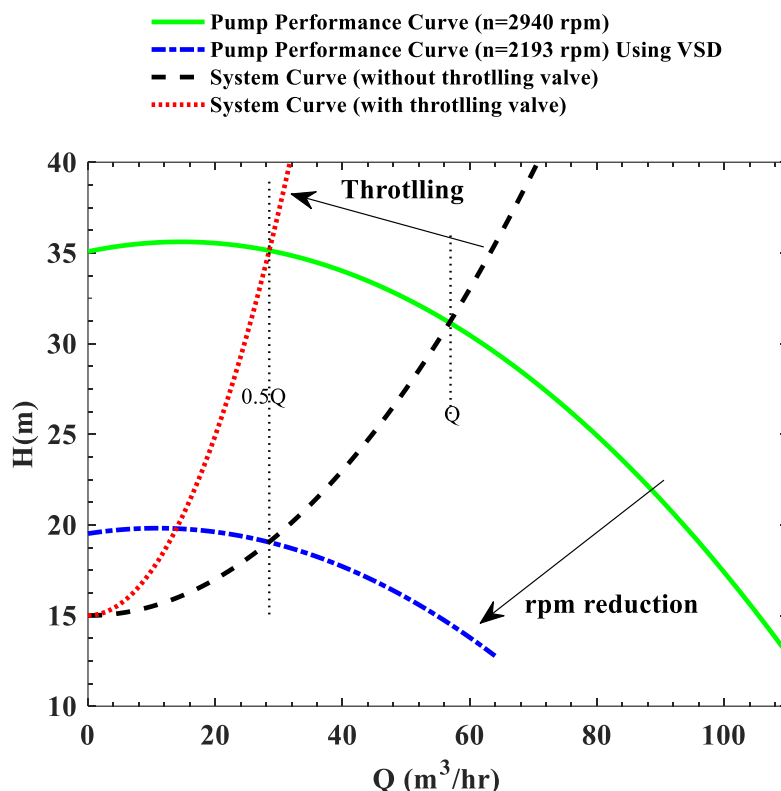


شکل 23-4 کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات ($H_s = 15 \text{ m} - K = 0.001$) از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی چهارم) [2]

مطابق شکل (4-24) برای سناریوی شماره 5 ($H_s = 15 \text{ m} - K = 0.005$):

- منحنی سیستم به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است
- بعد از بستن شیر اختناق و رساندن دبی به 50٪ دبی اولیه، منحنی سیستم به شکل منحنی قرمز نقطه چین در آمده، در این حالت مطابق شکل هد تولیدی پمپ 35.1 m است (محل تلاقی منحنی سبز و قرمز) میزان توان مصرفی پمپ در این حالت بالا و در حدود 6.08 kw است.
- با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به 2193 rpm به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین تشابه به شکل منحنی نقطه چین آبی در می آید در این شرایط دبی تولیدی پمپ 50٪ دبی

اولیه و هد تولیدی پمپ در حدود 19.1 m (محل تلاقی منحنی آبی و مشکی) است. میزان توان مصرفی پمپ در این حالت پایین بوده (در حدود 2.71 kw) و میزان صرفه جویی انرژی در این حالت، نسبت به کنترل دبی، با شیر اختناق، 55.5% بدست آمد.

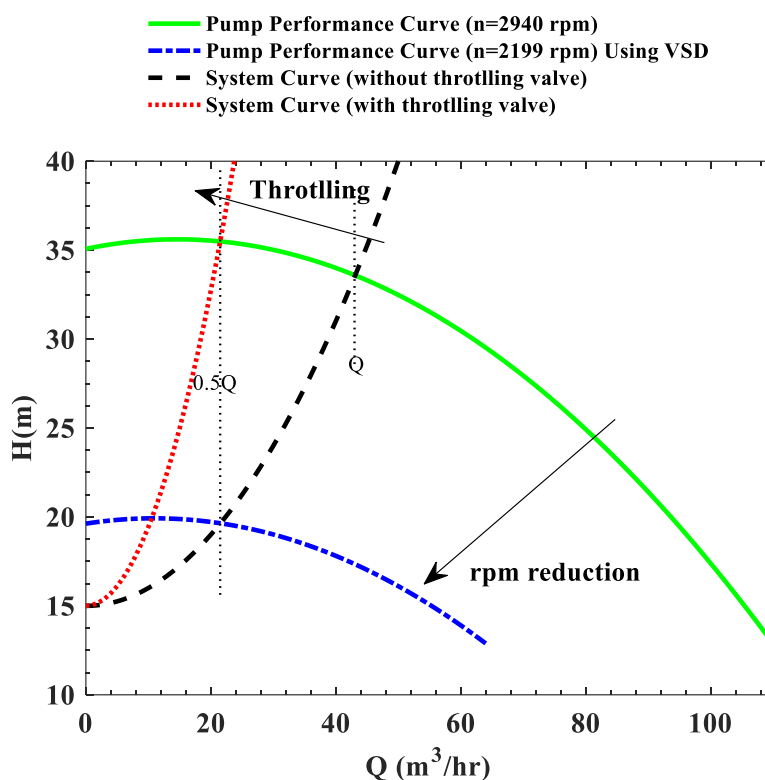


شکل 24-4 کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات $(H_s = 15 \text{ m} - K = 0.005)$ از طریق الف) شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی پنجم) [6]

مطابق شکل (25-4) برای سناریوی شماره 6 $(H_s = 15 \text{ m} - K = 0.010)$:

- منحنی سیستم به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است
- بعد از بستن شیر اختناق و رساندن دبی به 50٪ دبی اولیه، منحنی سیستم به شکل منحنی قرمز نقطه چین در آمده، در این حالت مطابق شکل هد تولیدی پمپ 35.5 m است (محل تلاقی منحنی سبز و قرمز) میزان توان مصرفی پمپ در این حالت بالا و در حدود 5.73 kw است.
- با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به 2199 rpm به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین

تشابه به شکل منحنی نقطه چین آبی در می‌آید در این شرایط دبی تولیدی پمپ 50٪ دبی اولیه و هد تولیدی پمپ در حدود 19.6 m (محل تلاقی منحنی آبی و مشکی) است. میزان توان مصرفی پمپ در این حالت پایین بوده (در حدود 2.55 kw) و میزان صرفه جویی انرژی در این حالت، نسبت به کنترل دبی، با شیر اختناق، 55.6٪ بدست آمد.



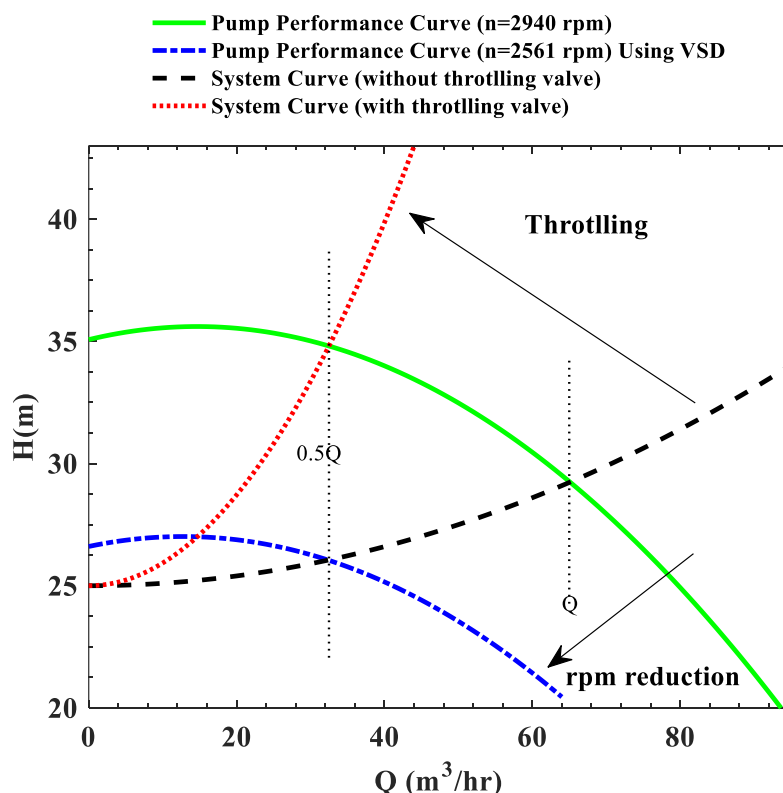
شکل 25-4 کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات ($H_s = 15 \text{ m} - K = 0.010$) از طریق الف) شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی ششم) [3]

مطابق شکل (25-4) برای سناریوی شماره 7 ($H_s = 25 \text{ m} - K = 0.001$):

- منحنی سیستم به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است
- بعد از بستن شیر اختناق و رساندن دبی به 50٪ دبی اولیه، منحنی سیستم به شکل منحنی قرمز نقطه چین در آمده، در این حالت مطابق شکل هد تولیدی پمپ 34.8 m است (محل تلاقی منحنی سبز و قرمز) میزان توان مصرفی پمپ در این حالت بالا و در حدود 6.27 kw است.

- با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به 2561 rpm به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین

تشابه به شکل منحنی نقطه چین آبی در می‌آید در این شرایط دبی تولیدی پمپ 50٪ دبی اولیه و هد تولیدی پمپ در حدود 26.1 m (محل تلاقی منحنی آبی و مشکی) است. میزان توان مصرفی پمپ در این حالت پایین بوده (در حدود 4.28 kw) و میزان صرفه جویی انرژی در این حالت، نسبت به کنترل دبی، با شیر اختناق، 31.7٪ بدست آمد.

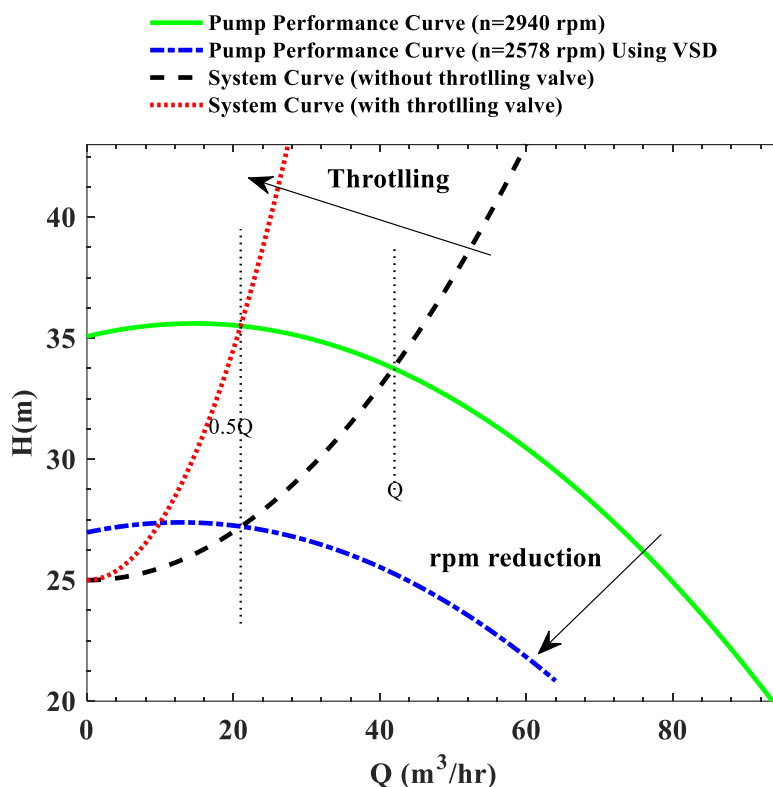


شکل 26-4 کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات (Hs= 25 m –K=0.001) از طریق الف (شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی هفتم) [4]

مطابق شکل (4-27) برای سناریوی شماره 8 (Hs=25 m –K=0.005):

- منحنی سیستم به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است
- بعد از بستن شیر اختناق و رساندن دبی به 50٪ دبی اولیه، منحنی سیستم به شکل منحنی قرمز نقطه چین در آمده، در این حالت مطابق شکل هد تولیدی پمپ 35.5 m است (محل تلاقی منحنی سبز و قرمز) میزان توان مصرفی پمپ در این حالت بالا و در حدود 5.71 kw است.

- با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به 2578 rpm به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین تشابه به شکل منحنی نقطه چین آبی در می‌آید در این شرایط دبی تولیدی پمپ 50٪ دبی اولیه و هد تولیدی پمپ در حدود 27.2 m (محل تلاقی منحنی آبی و مشکی) است. میزان توان مصرفی پمپ در این حالت پایین بوده (در حدود 3.95 kw) و میزان صرفه جویی انرژی در این حالت، نسبت به کنترل دبی، با شیر اختناق، 30.8٪ بدست آمد.



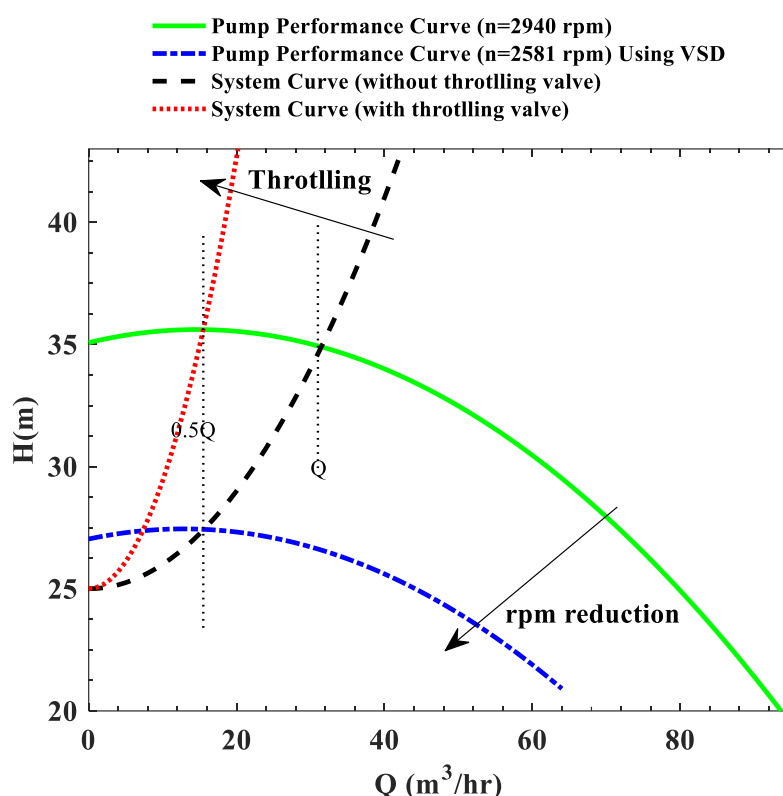
شکل 27-4 کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات $(H_s = 25 \text{ m} - K = 0.005)$ از طریق الف) شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی هشتم) [5]

مطابق شکل (4-28) برای سناریوی شماره 9 $(H_s = 25 \text{ m} - K = 0.010)$:

- منحنی سیستم به رنگ خط چین مشکی ترسیم شده است
- بعد از بستن شیر اختناق و رساندن دبی به 50٪ دبی اولیه، منحنی سیستم به شکل منحنی قرمز نقطه چین در آمده، در این حالت مطابق شکل هد تولیدی پمپ 35.6 m است (محل تلاقی منحنی سبز و قرمز) میزان توان مصرفی پمپ در این حالت بالا و در حدود 5.38 kw

است.

- با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به 2581 rpm به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین تشابه به شکل منحنی نقطه چین آب در می‌آید در این شرایط دبی تولیدی پمپ 50٪ دبی اولیه و هد تولیدی پمپ در حدود 27.4 m (محل تلاقی منحنی آب و مشکی) است. میزان توان مصرفی پمپ در این حالت پایین بوده (در حدود 3.73 kw) و میزان صرفه جویی انرژی در این حالت، نسبت به کنترل دبی، با شیر اختناق، 30.7٪ بدست آمد.



شکل 4-28 کاهش دبی به اندازه 50٪ برای سیستم با مشخصات $(H_s = 25 \text{ m} - K = 0.010)$ از طریق الف) شیر اختناق (throttling) ب) کاهش دور پمپ با VSD (سناریوی نهم) [2]

در جدول (4-5)، شرایط عملکردی پمپ و سیستم (دبی، هد، راندمان و توان مصرفی پمپ) برای

9 سناریو مورد بررسی برای روش شیر اختناق و روش VSD در این پژوهش ارائه شد. مطابق نتایج جدول، با بکارگیری درایور دور متغیر (VSD) می‌توان 31٪ تا 77٪ صرفه جویی در مصرف انرژی نسبت به حالت استفاده از شیر اختناق بدست آورد. (در محاسبه توان تولیدی بر حسب کیلو وات تبدیل واحد

m³/hr به m³/s انجام شده است.

جدول (4-5) شرایط عملکردی پمپ و سیستم برای 9 سناریو مورد بررسی در این پژوهش

scenario	Flow control method	Q _u (m ³ /hr)	H _u (m)	η (%)	$P(kw) = \frac{\rho g Q_u H_u}{1000}$	Energy Saving
1	Throttling valve	52	32.1	64.6	7.04	0
	Variable speed		7.7	67.8	1.61	77.2 %
2	Throttling valve	34	34.7	50.7	6.33	0
	Variable speed		10.8	67.2	1.48	76.6 %
3	Throttling valve	26	35.3	41.9	5.96	0
	Variable speed		11.8	59.3	1.4	76.5 %
4	Throttling valve	43.5	33.5	59	6.73	0
	Variable speed		16.9	67.6	2.96	56 %
5	Throttling valve	28.5	35.1	44.8	6.08	0
	Variable speed		19.1	54.7	2.71	55.5 %
6	Throttling valve	21.5	35.5	36.2	5.73	0
	Variable speed		19.6	45.1	2.55	55.6 %
7	Throttling valve	32.5	34.8	49.2	6.27	0
	Variable speed		26.1	53.8	4.28	31.7 %
8	Throttling valve	21	35.5	35.6	5.71	0
	Variable speed		27.2	39.4	3.95	30.8 %
9	Throttling valve	15.5	35.6	27.9	5.38	0
	Variable speed		27.4	31	3.73	30.7 %

نمودار هد تولیدی پمپ برای 9 سناریو، زمانیکه از شیر اختناق (قرمز) و درایور دور متغیر (سبز) برای

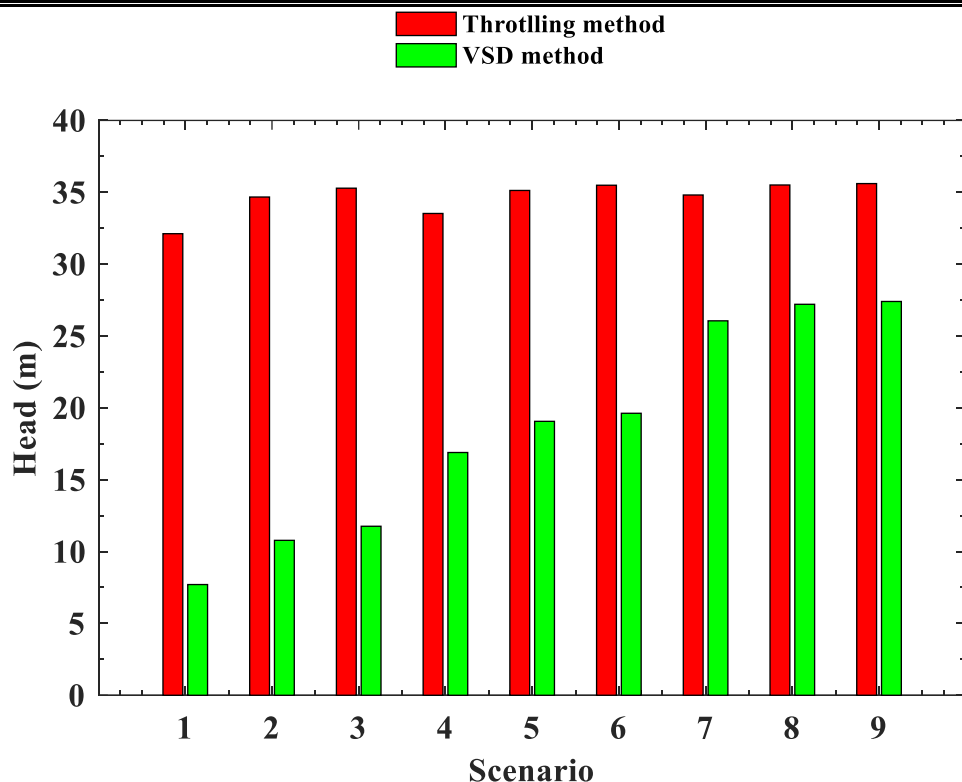
کاهش دبی به اندازه 50٪ استفاده شده است در شکل (4-29) ارائه شده است. هد تولیدی پمپ زمانیکه

از شیر اختناق استفاده شده است در حدود 30 تا 35 متر است و این میزان هد فشاری در شیر اختناق به

صورت اصطکاکی تلف میشود هد تولیدی پمپ زمانیکه از درایور دور متغیر جهت کاهش دبی به اندازه

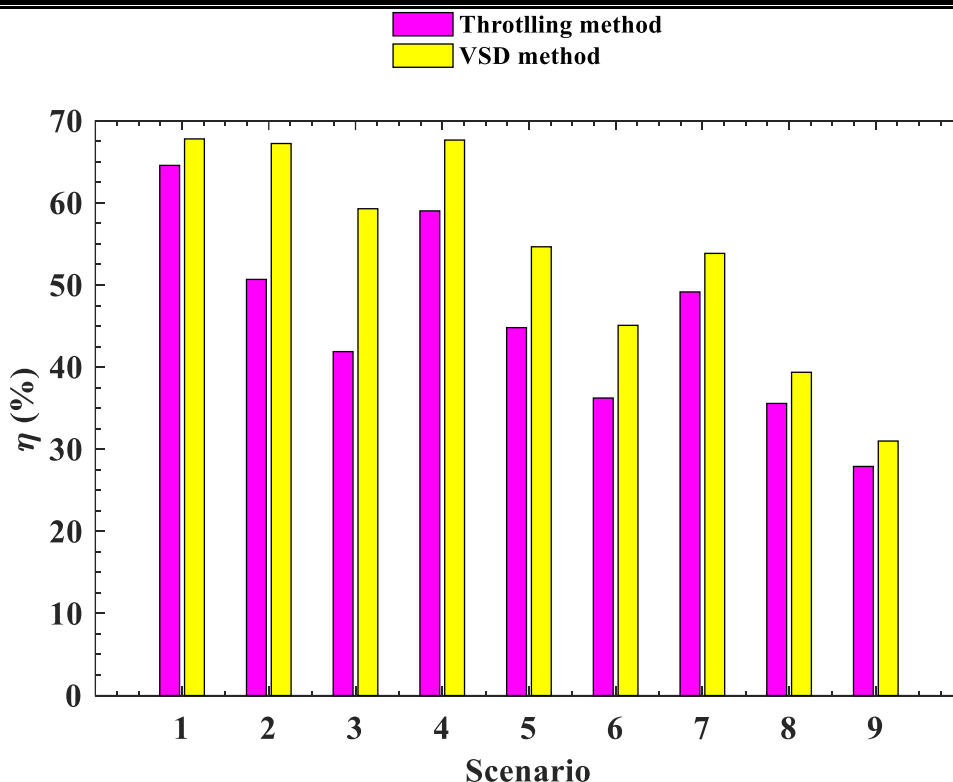
50٪ استفاده می کنیم بسیار کمتر و در حدود 8 متر تا 27 متر است. 27 متر مربوط به زمانی که هد

استاتیک سیستم بالاست (H_s=25 m) و 8 متر زمانیکه هد استاتیک سیستم پایین است (H_s=5 m)



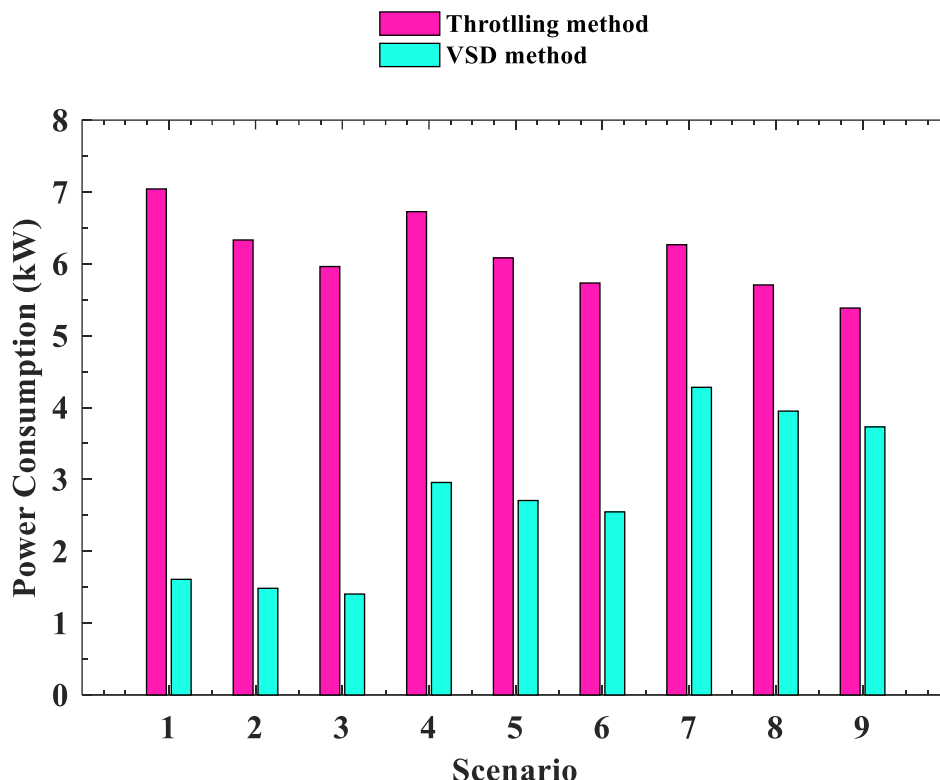
شکل 29-4) نمودار هد تولیدی پمپ برای 9 سناریو (شیر اختناق و کاهش دور با VSD) زمانیکه دبی پمپ به اندازه 50٪ کاهش می یابد [3]

نمودار راندمان تولیدی پمپ برای 9 سناریو، زمانیکه از شیر اختناق (بنفش) و درایور دور متغیر (زرد) برای کاهش دبی به اندازه 50٪ استفاده شده است در شکل (4-30) ارائه شده است. راندمان پمپ تابع دور پمپ و دبی پمپ است. مطابق نتایج، راندمان پمپ برای حالتی که از VSD بجای شیر اختناق استفاده شده اندکی بیشتر است.



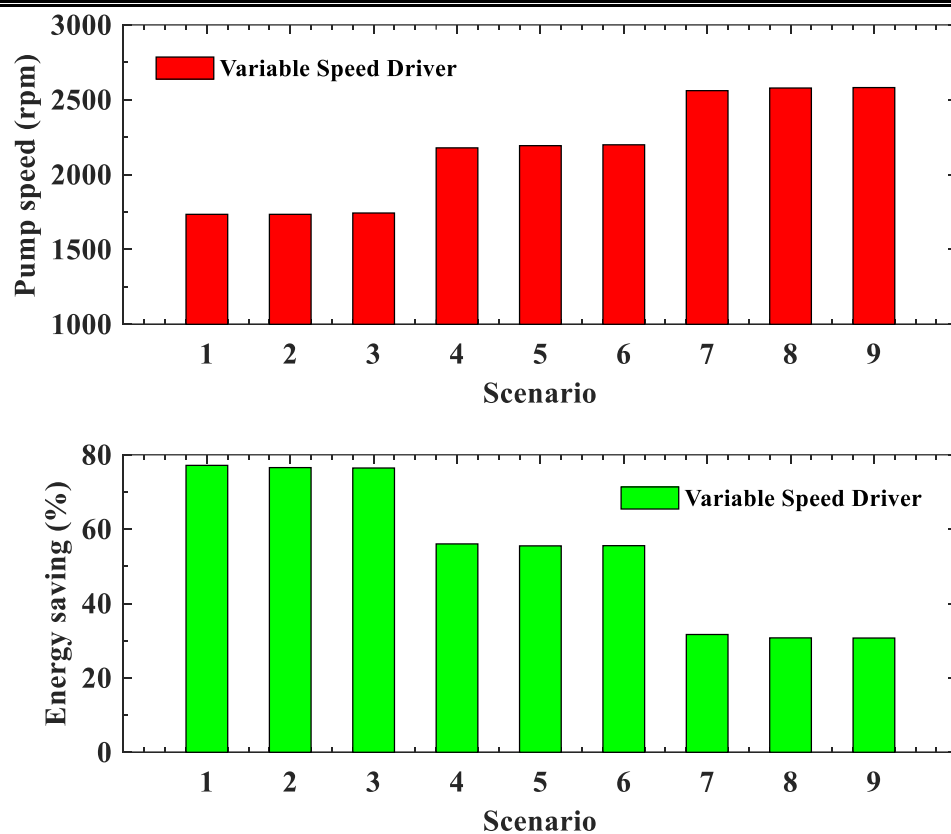
شکل 30-4) نمودار راندمان پمپ برای 9 سناریو (شیر اختناق و کاهش دور با VSD) زمانیکه دبی پمپ به اندازه 50٪ کاهش می یابد [4]

نمودار توان مصرفی پمپ برای 9 سناریو، زمانیکه از شیر اختناق (بنفش) و درایور دور متغیر (سبز) برای کاهش دبی به اندازه 50٪ استفاده شده است در شکل (4-31) ارائه شده است. توان مصرفی پمپ زمانیکه از شیر اختناق (5.5 kw تا 7 kw) استفاده شده است بسیار بیشتر از زمانی است که از درایور دور متغیر (1.4 kw تا 4.4 kw) استفاده شده است درصد زیادی از توان مصرفی پمپ بصورت اصطکاک در شیر اختناق تلف میشود. 4.4 kw مربوط به زمانی است که هد استاتیک سیستم بالاست (Hs=25 m) و 1.4 kw زمانیکه هد استاتیک سیستم پایین است (Hs=5 m)



شکل 31-4) نمودار توان مصرفی پمپ برای 9 سناریو (شیر اختناق و کاهش دور با VSD) زمانیکه دبی پمپ به اندازه 50% کاهش می یابد [5]

در شکل (4-32) نمودار دور پمپ و نمودار درصد صرفه جویی مصرف انرژی برای 9 سناریو کاهش دور با VSD در مقایسه با زمانی که از شیر اختناق جهت کاهش دبی پمپ به اندازه 50% استفاده شده است ارائه شده است. مطابق این نتایج، درصد صرفه جویی مصرف انرژی بین 31% تا 77% بدست آمد. 31% برای زمانیکه هد استاتیک سیستم مانند سناریوی 7 تا 9 بزرگ ($H_s=25\text{ m}$) است. 77% صرفه جویی مربوط به زمانیکه هد استاتیک سیستم پایین مانند سناریوی 1 تا 3 کوچک ($H_s=5\text{ m}$) است. بنابراین بکارگیری درایور دور متغیر (VSD) زمانی توجیه و صرفه اقتصادی دارد که هد استاتیک پایین باشد. همانطور که مشاهده می کنید روند تغییرات دور پمپ (1735 rpm تا 2581 rpm) بر خلاف روند تغییرات درصد صرفه جویی انرژی (77% تا 31%) است و در واقع با افزایش دور پمپ، درصد صرفه جویی انرژی کاهش می یابد. لازم بذکر است زمانیکه هد استاتیک سیستم زیاد ($H_s=25\text{ m}$) است (سناریوی 7 تا 9) نیاز به هد فشاری بالاتر و نیاز به rpm بالاتری می باشد. (شکل 4-32)



شکل 32-4) نمودار صرفه جویی مصرف انرژی برای 9 سناریو کاهش دور با VSD در مقایسه با زمانی که از شیر اختناق جهت کاهش دبی پمپ به اندازه 50٪ استفاده شده است [6]

فصل 5:

نتیجه گیری

5-1- مقدمه

جهت کنترل دبی سیال در فرآیندهای صنعتی روش های مختلفی از جمله بکارگیری شیر اختناق استفاده می شود. بکارگیری شیر اختناق بصورت دائم سبب هدر رفت انرژی می شود. کاهش دور پمپ به کمک تکنولوژی VSD یک راه حل دائم و بصره جهت کنترل و کاهش دبی سیال است. بدین منظور 9 سناریوی مختلف مورد بررسی قرار گرفت و میزان صرفه جویی مصرف انرژی برای زمانی که از VSD استفاده شده است بدست آمد. در این 9 سناریو، دبی و فشار مورد نیازی که پمپ می باست تامین کند متفاوت و وابسته به منحنی سیستم (مشخصات لوله و تجهیزات و دبی فرآیند) است.

5-2- جمع بندی

- در زیر مهمترین نتایج بدست آمده از این پژوهش بصورت خلاصه ارائه شده است:
- روش های مختلفی برای کنترل دبی سیال در صنعت وجود دارد. کنترل دبی با شیر اختناق و کنترل دبی با درایور دور متغیر پمپ، 2 روش از مهمترین روش های کنترل دبی می باشند. بکارگیری درایورهای دور متغیر یک روش جدید و مقرون به صرفه است که در صنعت کشورمان بسیار اندک به آن پرداخته شده است. از مزایای بکارگیری درایور دور متغیر این است که زمانیکه به دبی 100٪ نیاز نداریم یا پمپ oversize است می توان با کاهش دور پمپ هم در انرژی مصرفی پمپ صرفه جویی کرد و هم هزینه تعمیراتی پمپ را کاهش داد.
 - متاسفانه در اکثر موارد بهترین عامل در انتخاب محرک قیمت اولیه است. بدین معنی که سیستم بر مبنای کمیته سازی هزینه اولیه انتخاب می شود. در حالیکه در طول عمر مفید آن هزینه قابل توجهی صرف انرژی تلف شده و یا تعمیر و نگهداری می شود.
 - با توجه به اینکه هزینه های خرید پمپ معمولاً کمتر از 5 درصد هزینه های بهره برداری آن در طول عمر سیستم پمپ است. کیفیت بهره برداری عامل مهمتری در تصمیم گیری برای انتخاب

- سیستمهای پمپ به شمار می رود.
- با کاهش دور پمپ از 2940 rpm به دور پایین تر به کمک VSD، منحنی پمپ، مطابق قوانین تشابه اصلاح میشود در واقع محور هد پمپ با مجدور دور کاهیده شده و محور دبی با توان اول کاهش می یابد.
 - نتایج نشان داد هد تولیدی پمپ زمانی که از شیر اختناق استفاده شده است در حدود 30 تا 35 متر است و این میزان هد فشاری در شیر اختناق به صورت اصطکاکی تلف می شود هد تولیدی پمپ زمانی که از درایور دور متغیر جهت کاهش دبی به اندازه 50٪ استفاده میشود بسیار کمتر و در حدود 8 متر تا 27 متر است. 27 متر مربوط به زمانی که هد استاتیک سیستم بالاست (Hs=25 m) و 8 متر زمانی که هد استاتیک سیستم پایین است (Hs=5 m)
 - نتایج مدلسازی نشان داد راندمان پمپ تابع دور پمپ و دبی پمپ است. مطابق نتایج، راندمان پمپ برای حالتی که از VSD بجای شیر اختناق استفاده شده اندکی بیشتر است.
 - نتایج نشان داد توان مصرفی پمپ زمانی که از شیر اختناق (5.5 kw تا 7 kw) استفاده شده است بسیار بیشتر از زمانی است که از درایور دور متغیر (1.4 kw تا 4.4 kw) استفاده شده است درصد زیادی از توان مصرفی پمپ بصورت اصطکاک در شیر اختناق تلف می شود. 4.4 kw مربوط به زمانی است که هد استاتیک سیستم بالاست (Hs=25 m) و 1.4 kw زمانی که هد استاتیک سیستم پایین است (Hs=5 m)
 - نتایج مدلسازی برای درایور دور متحرک نشان داد با بکارگیری این روش میتوان به درصد صرفه جویی مصرف انرژی بین 31٪ تا 77٪ رسید. 31٪ برای زمانی که هد استاتیک سیستم مانند سناریوی 7 تا 9 بزرگ (Hs=25 m) است. 77٪ صرفه جویی مربوط به زمانی که هد استاتیک سیستم پایین مانند سناریوی 1 تا 3 کوچک (Hs=5 m) است.
 - نتایج نشان داد بکارگیری درایور دور متغیر (VSD) زمانی توجیه و صرفه اقتصادی دارد که هد

- استاتیک سیستم در مقایسه با هیدینامیک پایین باشد.
- نتایج نشان داد روند تغییرات دور پمپ (1735 rpm تا 2581 rpm) بر خلاف روند تغییرات درصد صرفه جویی انرژی (77٪ تا 31٪) است و در واقع با افزایش دور پمپ، درصد صرفه جویی انرژی کاهش می یابد. لازم بذکر است زمانیکه هد استاتیک سیستم زیاد ($H_s=25$ m) است (سناریوی 7 تا 9) نیاز به هد فشاری بالاتر و نیاز به rpm بالاتری می باشد.
 - هر چند که در سیستمهایی که هد استاتیک بالائی دارند با تغییر دور، راندمان پمپ هم به میزان زیادی تغییر می کند، ولی مزایای دیگر درایو استفاده از آن را بخوبی توجیه می کند. برای مثال میزان فشار هیدرولیک وارد شده به پره های پمپ سانتریفوژ با مجذور سرعت افزایش می یابد. این فشار بالای هیدرولیک بصورت نیرو به بیرینگهای پمپ اعمال شده و عمر مفید آنها را کاهش خواهد داد. خاطر نشان می شود که عمر بیرینگها بطور معکوس با توان هفتم سرعت متناسب است. از سوی دیگر با کاهش دور نوپز و نوسانات سیستم نیز کاهش پیدا می کند.
 - ویژگی اینکه کنترل کننده های دور موتور قادرند موتور را نرم راه اندازی کند موجب می شود علاوه بر کاهش تنشهای الکتریکی روی شبکه، از شوکهای مکانیکی به بار نیز جلوگیری می شود. این شوکهای مکانیکی می تواند باعث استهلاک سریع قسمت های مکانیکی بلبرینگها و گیربکس و نهایتاً قسمت هایی از بار شوند. راه اندازی نرم هزینه های نگهداری را کاهش داده و به افزایش عمر مفید محرکه ها و قسمت های دوار منجر خواهد شد.

3-5- پیشنهادات برای آینده

جهت بهبود و ارتقا کیفیت این پژوهش پیشنهادات زیر ارائه می گردد.

- 1- استفاده از پمپ های دیگر با منحنی مشخصه ی متفاوت
- 2- بهینه سازی دو هدفه صرفه جویی انرژی و هزینه کل (هزینه سرمایه گذاری اولیه + هزینه بهره برداری) به کمک الگوریتم ژنتیک
- 3- محاسبه دوره ی بازگشت سرمایه برای خریداری VSD در مقایسه با استفاده از شیر اختناق جهت کنترل دبی
- 4- بررسی اثر شیب منحنی مشخصه ی پمپ (H_p-Q) بر روی میزان درصد صرفه جویی انرژی
- 5- بررسی اثر شیب منحنی مشخصه سیستم (H_R-Q) بر روی میزان درصد صرفه جویی انرژی

مراجع

-
- 1 Abdelaziz EA, Saidur R, Mekhilef S. A review on energy saving strategies in industrial sector. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:150–68
- [2] U.S. Energy Information Administration. *International energy outlook 2016*; 2016
- [3] Waide P, Brunner CU. *Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems* international energy agency energy efficiency series; 2011.
- [4] European Commission. *Study on improving the energy efficiency of pumps*; 2001.
- [5] Viholainen J. *Energy-efficient control strategies for variable speed driven parallel pumping systems based on pump operation point monitoring with frequency converters*; 2014.
- [6] Olszewski P. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps. *Appl Energy* 2016;178:527–39
- [7] Tamminen J, Kosonen A, Ahonen T, Ahola J, Immonen P, Muetze A, et al. Component selection tool to maximize overall energy conversion efficiency in a pumping system. In: 2013 15th Eur. conf. power electron. appl. EPE 2013. IEEE; 2013, p. 1–9.
- [8] U.S. Department of Energy. *Improving motor and drive system performance*; 2008.
- [9] Kaya D, Yagmur EA, Yigit KS, Kilic FC, Eren AS, Celik C. Energy efficiency in pumps. *Energy Convers Manage* 2008;49:1662–73.
- [10] Lu S-M. A review of high-efficiency motors: specification, policy, and technology. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;59:1–12
- [11] Aranto N. *Competitor comparison: Variable speed drives in pumping applications*; 2008.
- [12] U.S. Department of Energy. *United States industrial electric motor systems market opportunities assessment*; 2002.
- [13] du Plessis GE, Liebenberg L, Mathews EH. The use of variable speed drives for cost-effective energy savings in South African mine cooling systems. *Appl Energy* 2013;111:16–27.
- [14] du Plessis GE, Liebenberg L, Mathews EH. Case study: the effects of a variable flow energy saving strategy on a deep-mine cooling system. *Appl Energy* 2013;102:700–9.
- [15] Ahonen T, Tamminen J, Ahola J, Kestilä J. Frequency-converter-based hybrid estimation method for the centrifugal pump operational state. *IEEE Trans Ind Electron* 2012;59:4803–9
- [16] Tamminen J, Viholainen J, Ahonen T, Ahola J, Hammo S, Vakkilainen E. Comparison of model-based flow rate estimation methods in frequency-converter-driven pumps and fans. *Energy Effic* 2013:1–13.
- [17] Eker, I., Grimble, M. J. and Kara, T. 2003. Operation and simulation of city of Gaziantep water supply system in Turkey. *J. Renew. Energ.* 28, 901-916.

-
- [18] Carsten-Skovmose, K. 2005. Fault detection and isolation in centrifugal pumps. Ph. D Thesis. Aalborg University.
- [19] Zulfiqar, A. S., Khalil, A., Waheed, S. and Aziz, A. 2012. MATLAB simulation of a variable speed controller for a three phase induction motor. 26 th I P u s' m a P a k s a Navy g g College. National University of Sciences and Technology. Islamabad, Pakistan
- [20] Ghafouri, J., Khayatzadeh, F. and Khayatzadeh, A. 2012. Dynamic modeling of variable speed centrifugal pump utilizing MATLAB/SIMULINK. J. Sci. Eng. Invest. 1(5): 121-138.
- [21] Yari, A. 2010. Developing an intelligent control and monitoring system of pumping plants. Technology Incubator Center Science and Technology Park University of Tehran
- [22] Keyser, W., Amerlinck, Y., Urchegui, G., Harding, T., Maere, T. and Nopens, I. 2014. Detailed dynamic pumping energy models for optimization and control of wastewater applications. J. Water Climate Change. 5 (3): 299-314.
- [23] Hanson, B., Weigand, Z. and Orloff, S. 1996. Performance of electric irrigation pumping plants using variable frequency drives. J. Irrig. Drain. Eng. 122(3): 91-104.
- [24] Moreno, M. A., Planells, P., Co'rcoles, J. I., Tarjuelo, J. M. and Carrio'n, P. A. 2009. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. Biosystems Eng. 102, 95-105
- [25] Y. Fu, K. Wu, Y. Cai. The influences of back pressure on variable-speed control, World Pumps, 461, 2005, 34-37. [2] A.H.W. Lee, Successful case studies of energy savings using adjustable speed drives for pumps and fans, Energy Engineering, 98, 2001, 45-51.
- [26] R.R. Vaillencourt, The correct formula for using the affinity laws when there is a minimum pressure require- ment, Energy Engineering, 102, 2005, 32-46.
- [27] S. Chantasiriwan, Method for estimating energy sav- ing by variable-speed control of centrifugal pump, Pro- ceedings of the IASTED International Conference on Mod- elling, Simulation, and Identification, Beijing, China, 2009.
- [28] B. Ulanicki, J. Kahler, B. Coulbeck, Modeling the effi- ciency and power characteristics of a pump group, Journal of Water Resources Planning and Management, 134, 2008, 88- 93.
- [29] Nourbakhsh, A., Jaumotte, A., Hirsch, C., & Parizi, H. B. (2007). Turbopumps and pumping systems. Springer Science & Business Media.
- [30] B. Ulanicki, J. Kahler, B. Coulbeck, Modeling the effi- ciency and power characteristics of a pump group, Journal of Water Resources Planning and Management, 134, 2008, 88- 93.

پیوست ها

Abstract:

Today, in industrialized countries, environmental requirements, on the one hand, and energy optimization management, on the other, have become inevitable. A set of measures taken to save energy in factories. Includes such things as replacing electric motors with high-efficiency motors, using motor speed controllers in applications where energy loss is high. Various methods are used to control fluid flow in industrial processes, including the use of throttle valves. Using the suction valve permanently wastes energy. Reducing pump speed with VSD technology is a permanent and cost-effective solution to control and reduce fluid flow. One of the advantages of using a variable speed driver is that when we do not need 100% flow or the pump is oversize Can By reducing the pump speed, it both saves the energy consumed by the pump and reduces the cost of repairing the pump. Modeling results For the mobile driver, it was shown that by using this method, the energy saving percentage can be reached between 31% and 77%.31% for when the static head of the system is large as in scenario 7 to 9 ($H_s = 25$ m). 77% savings when the static head of the system is low as in scenario 1 to 3 small ($H_s = 5$ m).

Keywords: G...



Energy Institute of Higher Education

Modeling pump flow control in industrial processes with the help of throttle valve and variable speed driver in terms of energy consumption

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Master of Science in Mechanical engineering majoring in
conversion energy**

By:

Sadegh Imani

Supervisor:

Dr. Seyd Iman Vasefi

Advisor:

Dr. Heydar Madah

september 2020

