

# مطالعه آزمایشگاهی و مدلسازی ریاضی نشست مواد آلی سنگین

## در خط لوله انتقال نفت

عباس شهرآبادی ، مهدی فصیح ، مریم سعدی و (1) بهرام دبیر  
پژوهشکده اکتشاف و تولید، پژوهشگاه صنعت نفت  
(1) دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

در این تحقیق مساله تشکیل رسوب واکس در خطوط انتقال به صورت تئوری و عملی مطرح و برای روشن شدن بخشی از این پدیده تلاش شده است. در بخش تئوری به دلیل نیاز به یک مدل ریاضی به منظور پیش بینی مقدار رسوب ایجاد شده در شرایط انتقال نفت خام حاوی واکس، یک مدل ریاضی با در نظر گرفتن پدیده ترمودینامیکی تشکیل رسوب و همچنین پدیده های انتقال ارایه و برنامه کامپیوتری جامعی در این رابطه تهیه شده که نتایج آن با نتایج تجربی مقایسه شده است. قابل ذکر است در این مدل برای اولین بار نفت به صورت سیال غیر نیوتونی در نظر گرفته شده است. در قسمت عملی، به انجام آزمایشات بر روی یک برش نفتی حاوی واکس که به صورت مصنوعی از حل کردن واکس در تولوئن تهیه شده، پرداخته شده است و عامل های موثر نظیر دبی جریان، غلظت واکس، اثر زمان و اختلاف درجه حرارت سیال ورودی و جداره لوله در شرایط آزمایشگاهی بررسی و نتایج مربوط با پیش بینی های مدل مقایسه شده است که نزدیکی بین این دو نشان دهنده قابلیت این مدل در پیش بینی مقدار رسوب واکس در شرایط انتقال نفت خام می باشد.

## Mathematical Modeling and Experimental study of Heavy Organic Deposition in Oil Pipeline

A. Shahrabadi, M. Fasih, M. Sadi and (1) B. Dabir

Research Institute of Petroleum Industry, P.O.Box: 18745-4163, Tehran, Iran

(1) Amir Kabir University of Technology

### ABSTRACT

The main goal of this study is to investigate the mechanism of wax precipitation through the petroleum pipelines. In order to achieve this target, this phenomenon has been examined from two different view points: theoretical and experimental study. The theory of this research seeks for predicting the quantity of wax deposition through petroleum pipelines. Mathematical model considers some important factors such as thermodynamic aspects of wax precipitation and fluid transport phenomena. In this paper the procedure for generating the mathematical model is described in detail. The second part of the research looks for

doing some experiments with an oil-based cut which was synthesized by solving wax in toluene solvent. During the experiments, different parameters such as fluid flow rate, wax concentration, time effect and temperature difference between inlet fluid and pipe wall were considered at laboratory conditions. The results obtained from theoretical model were compared with experimental data. It was founded out that there is an acceptable match between experimental and theoretical data and to some extent; this confirms the validity of the model.

### مقدمه

در چند دهه گذشته یکی از مهمترین معضلات صنعت نفت در زمینه‌های استخراج و بهره‌برداری، ذخیره نفت خام در مخازن سطحی و خطوط انتقال نفت خام و مواد سنگین هیدروکربنی، تشکیل مواد ارگانیک سنگین و به دنبال آن ایجاد رسوب در روی سازندهای نفتی و تاسیسات و خطوط انتقال نفت خام بوده است. ترکیباتی که ممکن است در این رسوبات وجود داشته باشند عبارت‌اند از: هیدروکربن‌های آلیفاتیک (شاخه‌ای و خطی)، هیدروکربن‌های آروماتیک، رزینها و آسفالتین‌ها، نفتن‌ها [۱]. این ترکیبات می‌توانند یا به صورت خالص یا به صورت ترکیبی از موارد بالا در نفت موجود باشند. در مراحل استحصال اولیه، ثانویه و ثالثیه به علت تغییر در شرایط ترمودینامیکی نظیر تغییر در ترکیب درصد نفت (به علت تزریق یا تولید)، درجه حرارت (در چاههای تولید) و تغییر در فشار (به علت تزریق یا تولید) تعادل ظریف ترمودینامیکی مواد آلی سنگین نظیر واکس و آسفالت به هم ریخته و در نتیجه مواد جامد با مکانیزم‌های مختلف تشکیل و در اثر حرکت در محیط متخلخل سازند یا داخل لوله چاه تولید رسوب می‌نمایند. از بین بردن این رسوب در این شرایط بعضی مواقع غیرممکن و یا اینکه هزینه بر و طاقت فرسا می‌باشد. در مرحله ذخیره نفت خام در مخازن سطحی مجدداً به دلیل تغییر در شرایط ترمودینامیکی ناشی از تغییر دما یا اختلاط چند نفت خام، مواد سنگین با ضخامت‌های بالا و در بعضی مواقع تا ضخامت دو متر در ته مخازن نفتی رسوب می‌کند (چندین مخزن در جزیره خارک)، که عملاً باعث غیر استفاده شدن مخزن تا تخلیه نهایی می‌شود. همچنین در اثر انتقال نفت خام و برشهای سنگین نفتی به علت تغییر در شرایط ترمودینامیکی ابتدا مواد سنگین تشکیل و سپس در اثر مکانیزم‌های مختلف در دیواره‌ها رسوب می‌کند. این پدیده مشکلات فراوانی را در خطوط لوله باعث می‌شود. رسوبات، زبری سطح لوله را افزایش داده و در نتیجه، قطر موثر لوله کاهش می‌یابد و این باعث افزایش افت فشار در خطوط لوله

می‌شود و به مرور ممکن است با افزایش ضخامت رسوب ظرفیت خط لوله کاهش یابد و باعث از کار افتادن دستگاههای عملیاتی شود. موارد فوق و اثرات فنی-اقتصادی آن و با توجه به این که این مساله یک مشکل جهانی بوده و یکی از مشکلات مهم کشورهای صادر کننده و مصرف کننده نفت می‌باشد و کشور ایران به عنوان یک کشور صادر کننده نفتی از این امر مستثنی نیست و برای حل این مساله مهم در صنعت نفت احتیاج به یک بررسی کامل و جامع از بعد نظر و آزمایشگاهی داریم. طبق تحقیقات به عمل آمده مشخص شده که واکس رسوب شده در حین تولید و انتقال نفت خام عمدتاً شامل پارافین‌های طبیعی با مقدار کمی زنجیره‌های شاخه‌دار و پارافین‌های حلقوی و آروماتیک‌ها است [۲]. با توجه به تعریف قبلی در مورد مشکلات رسوب، ترکیبات آلی نفت خام و پارافین‌ها باید در شرایط تولید و انتقال غیر محلول در نفت خام باشند [۳] حلالیت واکس‌های پارافینی نسبت به تغییرات دمایی بسیار حساس می‌باشند و همه عواملی که در کاهش دمای نفت دخالت دارند در افزایش درجه تبلور واکس سهم می‌باشند. با کاهش دما رسوب واکس نیز افزایش می‌یابد [۴]. و به دلیل وارد شدن اجزاء سبکتر از فاز مایع به فاز جامد م وزن ملکولی میانگین کاهش می‌یابد [۵].

سلیمانی نظر و همکاران مطالعات جامعی بر روی عوامل موثر بر روی رسوب واکس انجام دادند و به عواملی نظیر مشخصه‌های جریانی از قبیل دبی جریان، اختلاف دما و نرخ سرمایش روی رسوب واکس اشاره کردند [۶]. همچنین با توجه به اینکه در حین رسوب، بلورهای واکس به سطح لوله می‌چسبند، بنابراین رسوب واکس تابعی از خواص سطح لوله نیز می‌باشد. پارکس [۷] نشان داد که حضور فیلم‌های جذب شده خاص بر روی سطوح لوله، چسبندگی پارافین با سطح را کاهش خواهد داد. فرناندز و رودریگز [۸] پیشنهاد یک ساختمان خوشه‌ای را برای بلورهای واکس داده‌اند. بعضی از محققین عقیده دارند که واکس‌های موجود در نفت هم ساختمان کریستالی و هم طبیعت آمورف دارند ولی بعضی بر

این باورند که تمام واکس های موجود در نفت طبیعت کریستالی دارند. برن و همکارانش [۹] پدیده رسوب واکس و پارافین در خطوط انتقال نفت دریای شمال را بررسی کرده و گزارش کردند که لایه مرزی آرام، کنترل کننده سرعت رسوب واکس می باشد. همچنین آنها معتقد به دو مکانیزم نفوذ ملکولی و پراکندگی برش برای رسوب واکس بودند. البته آنها متذکر شدند که در دماهای بالا و فشار حرارتی بالا، نفوذ ملکولی مکانیزم غالب بوده در حالی که در دماهای پایین و فشار های حرارتی پایین پراکندگی برش مکانیزم غالب در رسوب واکس می باشد. برگر و همکارانش [۱۰] این پدیده را در خطوط لوله آلاسکا مورد مطالعه قرار دادند و خاطرنشان ساختند که مکانیزم کنترل کننده رسوب واکس در دماهای بالا، و فشار حرارتی بالا نفوذ ملکولی در زیر لایه آرام می باشد. اسپرگر [۱۱] رسوب واکس در لوله های ۲۴ اینچ در اعماق دریا، را مورد مطالعه قرار داد و نتیجه گرفت که با گذشت زمان رسوب شکل گرفته با نفوذ اجزا، سنگین تر به طرف دیواره لوله سخت تر می شود. اس وندسن [۱۲] یک مدل ریاضی برای پیش بینی رسوب واکس در خطوط لوله ارائه داد. او در مدل خود با استفاده از تئوری تعادل فاز و روابط ترمودینامیکی و پدیده های انتقال، مقدار رسوب واکس را پیش بینی کرد. نواقص این مدل در این است که پروفایل سرعت سیال در لوله به صورت پیستونی در نظر گرفته شده است و همچنین محاسبات تعادلی برای یک سیستم دو جزئی به کار گرفته شده است و داده های آزمایشگاهی برای تطبیق با مدل ارائه نشده است.

در این مطالعه رسوب واکس در خطوط انتقال مورد بررسی قرار گرفته، خوراک به صورت یک مخلوط چند جزئی در نظر گرفته شده، جریان سیال در داخل لوله آرام و سیال در دو حالت نیوتونی و حالت خاص غیر نیوتونی پاورلا در نظر گرفته شده است. در مدل ارائه شده از گرمای ناشی از انتقال فاز و اصطکاک، نفوذ حرارتی محوری در مقایسه با گرمای جابه

جایی صرف نظر شده است. همچنین با توجه به این که حرکت لایه مرزی واکس، بسیار کند می باشد، مدل شبه پایا برای معادلات جرم و انرژی در نظر گرفته شده است. مدل تعادلی مورد استفاده مدل ترمودینامیکی دو فازى Won [۵] می باشد. به منظور آزمایش اعتبار مدل، آزمایشات تجربی بر روی یک برش مصنوعی نفتی که از حل کردن واکس در تولوئن تهیه شده، انجام گرفته و ملاحظه شد که نتایج آزمایش موافقت خوبی با پیش بینی مدل دارند.

### معادلات حاکم

از آنجایی که گرانروی نفت به دما، زمان و تاریخچه برش وابسته است بیان خواص دقیق جریانی نفت های واکس دار کاری بسیار پیچیده و دشوار است. در این جا سیال را غیر نیوتونی و در حالت خاص پاورلا در نظر می گیریم. همچنین تنها مکانیزم رسوب واکس را نفوذ ملکولی در نظر می گیریم. یعنی ذرات واکس به صورت شعاعی به وسیله نفوذ ملکولی به طرف دیواره لوله حرکت و در نهایت روی دیواره رسوب می کنند.

همان گونه که می دانیم نفت خام از تعداد زیادی اجزاء هیدروکربنی تشکیل شده است. با صرف نظر از فاز بخار در شرایط رسوب واکس، دو فاز مایع و جامد در فشار و دمای مورد نظر، در حال تعادل می باشند. طبق تعریف ضریب تعادل مایع-جامد برای هر جزء در این مخلوط داریم [۴]:

$$K_i = \frac{S_i}{x_i} = \frac{\gamma_{si}}{\gamma_{si}} \exp \left[ \frac{\Delta h_i^f}{RT} \left( 1 - \frac{T}{T_i^f} \right) \right], \quad i = 1, 2, \dots, n_c \quad (1)$$

اگر تعداد مولهای در حال تعادل در فاز مایع و جامد، به ازای یک مول خوراک، به ترتیب L و S باشد:

$$z_i = Lx_i + Ss_i \quad (2)$$

معادله محدود کننده زیر، نیز برقرار می باشد:

$$L + S = 1 \quad (3)$$

کسر وزنی هر جزء در خوراک را به صورت زیر مشخص می کنیم:

$$w_i = \frac{z_i M w_i}{\sum_{i=1}^{n_c} z_i M w_i} \quad (۴)$$

همچنین، نسبت وزنی جزء  $i$  که در فاز جامد، موجود می باشد از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$w_{ii} = \frac{S s_i M w_i}{z_i M w_i} \quad (۵)$$

با تقسیم رابطه فوق بر  $L x_i$  و استفاده از معادله ۲، داریم:

$$w_{ii} = \frac{\frac{S}{L} \cdot \frac{s_i}{x_i}}{1 + \frac{S}{L} \cdot \frac{s_i}{x_i}} = \frac{\frac{S}{L} \cdot K_i}{1 + \frac{S}{L} \cdot K_i} = \frac{\theta K_i}{1 + \theta K_i} \quad (۶)$$

که در رابطه فوق،  $\theta = \frac{S}{L}$  می باشد. اگر نسبت وزنی جزء  $i$  فاز جامد موجود در مخلوط را  $w_{si}$  بنامیم:

$$w_{si} = \frac{S s_i M w_i}{\sum_{i=1}^{n_c} z_i M w_i} \quad (۷)$$

از تلفیق معادله فوق و معادله (۴) به رابطه زیر می رسمیم:

$$w_{si} = \frac{w_i S s_i M w_i}{z_i M w_i} = w_i w_{ii} \quad (۸)$$

حال برای محاسبه نسبت وزنی کل کریستال های واکس در مخلوط می توان رابطه فوق را برای تمام اجزاء موجود جمع کرد:

$$w_s = \sum_{i=1}^{n_c} w_{si} = \sum w_i \frac{\theta K_i}{1 + \theta K_i} \quad (۹)$$

قابل ذکر است که  $w_i$  یک خاصیت جرمی نفت می باشد و هیچ وابستگی دمایی ندارد، در حالی که  $w_{ii}$  تابعی از فشار و دما می باشد. به طوری که تغییرات آن نسبت به دما را می توان به صورت زیر نشان داد:

$$\frac{\partial w_{ii}}{\partial T} = \frac{K_i \frac{\partial \theta}{\partial T} + \theta \frac{\partial K_i}{\partial T}}{(1 + \theta K_i)^2} - \frac{\left[ (1 + \theta)^2 \frac{\partial L}{\partial T} + \theta \frac{\Delta h_i^f}{RT^2} \right] K_i}{(1 + \theta K_i)^2} \quad (۱۰)$$

که در رابطه فوق نسبت  $\frac{\gamma_{xi}}{\gamma_{si}}$  ثابت در نظر گرفته شده است.

بنابراین:

$$\frac{\partial w_{si}}{\partial T} = w_i \frac{\partial w_{ii}}{\partial T} \quad (۱۱)$$

حال عامل بدون بعد  $\sigma_i$  را به صورت زیر تعریف می کنیم و در ادامه خواهیم دید که فلاکس جرمی بر حسب تابعی از این پارامتر بیان می شود.

$$\sigma_i = -T \frac{\partial w_{si}}{\partial T} = \frac{w_i \left[ T(1 + \theta)^2 \frac{\partial L}{\partial T} + \theta \frac{\Delta h_i^f}{RT} \right] K_i}{(1 + \theta K_i)^2} \quad (۱۲)$$

اگر به جای  $\theta$  جایگذاری شود تنها مجهول های معادله فوق  $\frac{\partial L}{\partial T}$ ،  $L$  خواهد بود که این مقادیر با انجام محاسبات فلاش دو فازی مایع-جامد به دست می آید.

حال اگر حجم اشغال شده توسط یک مول از مخلوط جامد و مایع را  $V$  در نظر بگیریم  $w_s$  را به صورت زیر نیز می توان تعریف کرد:

$$w_s = \frac{\frac{1}{V} \sum_{i=1}^{n_c} S s_i M w_i}{\frac{1}{V} \sum_{i=1}^{n_c} z_i M w_i} = \frac{\rho_s}{\rho_m} \quad (۱۳)$$

که در معادله فوق  $\rho_s$  دانسیته وزنی فاز جامد و  $\rho_m$  دانسیته مخلوط می باشد. بنابر این دانسیته وزنی فاز مایع به صورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\rho_x = \rho_m - \rho_s \quad (۱۴)$$

نقطه شروع برای محاسبه رسوب واکس، معادله پیوستگی می باشد که در حالت کلی به صورت زیر می باشد:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot \rho_i u^v = -\nabla \cdot J_i \quad (۱۵)$$

همان گونه که قبلا بیان شد، در این مدل از فرض شبه پایا استفاده شده است و همچنین تنها مکانیزم انتقال واکس در جهت شعاعی، مکانیزم نفوذ در نظر گرفته شده است. با ساده سازی معادله (۱۵) با استفاده از فرضیات ذکر شده، اگر

فلاکس کلی جرمی شعاعی را بتوان از قانون فیک به دست آورد داریم:

$$J = -D_m \frac{\partial \rho_x}{\partial r} \quad (۱۶)$$

که در معادله فوق  $D_m$  ضریب نفوذ جرمی مخلوط است. معادله فوق به صورت زیر قابل بسط می باشد:

$$J = -D_m \frac{\partial \rho_x}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = -D_m \rho_m \left[ -T \frac{\partial w_s}{\partial T} + (1 - w_s) \frac{T}{\rho_m} \frac{\partial \rho_m}{\partial T} \right] \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (۱۷)$$

در به دست آوردن معادله فوق از معادلات (۱۳) و (۱۴) کمک گرفته شده است. معادله (۱۷) را با استفاده از معادله (۱۲) به شکل زیر بازنویسی می کنیم:

$$J = \sum_{i=1}^{n_c} J_i = -D_m \rho_m \left[ \sum_{i=1}^{n_c} \sigma_i + (w_i - w_{si}) \frac{T}{\rho_m} \frac{\partial \rho_m}{\partial T} \right] \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (۱۸)$$

اگر در معادله فوق  $J \leq 0$  شود، هیچگونه رسوبی تشکیل نمی شود. لازم به یادآوری است که برای محاسبه ضریب نفوذ ملکولی از رابطه Wilke- Chang که به صورت زیر است استفاده شد:

$$D_m = \frac{7.4 \times 10^{-8} T (\phi M_w)}{\mu V^{0.6}} \quad (۱۹)$$

$\phi$  ضریب جمعی است که برای هر نفت مقدار ثابتی است. برای محاسبه گرانیوی محلول از رابطه زیر استفاده شد:

$$\mu = A \exp\left(\frac{B}{T}\right) \quad (۲۰)$$

که ثوابت A و B برای هر نوع نفت مقدار ثابتی است و ما در این جا با انجام یکسری آزمایشات برای برش نفتی ثوابت فوق را به دست آورده ایم.

### محاسبه نسبت وزنی واکس بر حسب طول لوله

برای محاسبه نسبت وزنی واکس در طول لوله از یک موازنه

جرمی بر روی المانی بین  $Z$  و  $Z + \Delta Z$  کمک می گیریم. این موازنه به صورت زیر نوشته می شود:

$$\rho_i(Z + \Delta Z, t)q - \rho_i(Z, t)q = -2\pi R_w J_i \Delta Z \quad (۲۱)$$

در این رابطه  $q$  دبی حجمی است و ثابت فرض می شود. با تقسیم رابطه بر  $\Delta Z$  و گرفتن حد داریم:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial Z} = \frac{-2\pi R_w J_i}{q} \quad (۲۲)$$

دانسته کل مخلوط نیز در این محدوده تغییر می کند و به صورت زیر بیان می شود:

$$\rho_m(Z + \Delta Z, t) = \rho_m(Z, t) - \sum_{i=1}^{n_c} \frac{2\pi R_w J_i \Delta Z}{q} \quad (۲۳)$$

پس نسبت وزنی واکس در موقعیت  $Z + \Delta Z$  با رابطه زیر به دست می آید:

$$w_i(Z + \Delta Z, t) = \frac{\rho_i(Z + \Delta Z, t)}{\rho_m(Z + \Delta Z, t)} = \frac{\rho_i(Z, t) - \frac{2\pi R_w J_i \Delta Z}{q}}{\rho_m(Z, t) - \frac{2\pi R_w J_i \Delta Z}{q}} \quad (۲۴)$$

و یا:

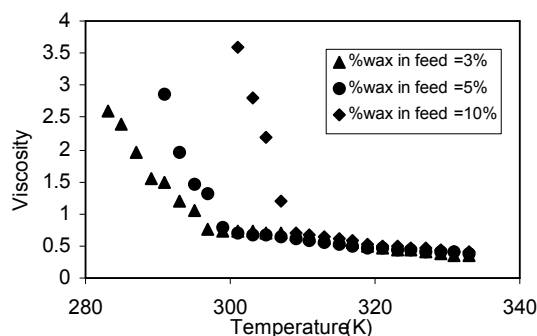
$$w_i(Z + \Delta Z, t) = \frac{w_i(Z, t) - \frac{2\pi R_w J_i \Delta Z}{q \rho_m}}{1 - \sum_{i=1}^{n_c} \frac{2\pi R_w J_i \Delta Z}{q \rho_m}} \quad (۲۵)$$

و نسبت وزنی کل واکس در موقعیت  $Z$  و زمان  $t$  به شکل زیر به دست می آید:

$$w_s(Z, t) = \sum_{i=1}^{n_c} w_{si}(Z, t) = \sum_{i=1}^{n_c} w_i(Z, t) w_{ii}(Z, t) \quad (۲۶)$$

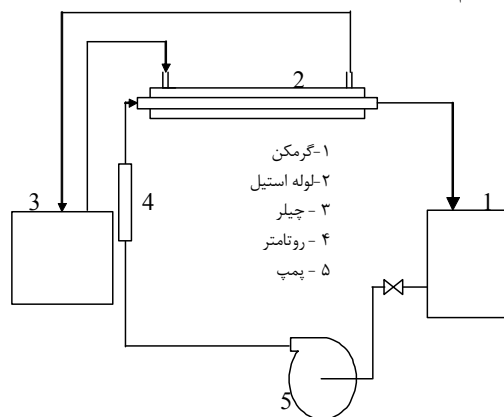
## آزمایشات تجربی

یکی از عواملی که ارتباط بین معادلات مومتم و حرارت را ایجاد می کند گرانیوی سیال می باشد. برای افزایش دقت مدل، آزمایشاتی در شرایط استاتیکی و با استفاده از ویسکومتر لوله موئین انجام گرفت و بدین ترتیب گرانیوی خوراکیهای مختلفی که در آزمایشات مربوط به رسوب واکس از آنها استفاده شده در دماهای مختلف اندازه گیری شد و سعی در ایجاد رابطه ای بین گرانیوی و دما شد. نتایج حاصل از این آزمایشات در نمودار ۱ مشاهده می شود. همان گونه که دیده می شود گرانیوی با دما تابعیت نمایی دارد و در یک نقطه، جهش در گرانیوی مشاهده می شود که این نقطه به نقطه ظهور واکس موسوم است.



نمودار ۱- تابعیت دمایی ویسکوزیته محلول واکس دار با غلظت های مختلف واکس

برای انجام آزمایشات مربوط به رسوب واکس در داخل لوله از سیستم نمودار ۲ استفاده شد.



حال برای محاسبه فلاکس گرمی، به گرادیان دمایی  $\frac{\partial T}{\partial r}$  نیاز است که در قسمت بعد به دست می آوریم.

### توزیع دما در داخل لوله

توزیع دمای نفت در حال جریان بستگی به پروفایل سرعت دارد. اگر سیال نفتی را به صورت پاورلا در نظر بگیریم، توزیع سرعت جریان آرام در داخل لوله به شکل زیر می باشد:

$$V_z(r) = V_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^{1+n} \right] \quad (27)$$

$$V_{\max} = \bar{V} \left( \frac{3n+1}{n+1} \right) \quad (28)$$

با صرف نظر کردن از هدایت محوری و حرارت ناشی از اصطکاک و همچنین صرف نظر از ترم منبع حرارتی در معادله انرژی، معادله انرژی به صورت ساده شده زیر در می آید:

$$V_z(r) \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (29)$$

با جایگذاری پروفایل سرعت در معادله فوق و حل این معادله با شرایط مرزی زیر توزیع دما در لوله را می توان به دست آورد:

$$T(R, z) = T_0 = cte$$

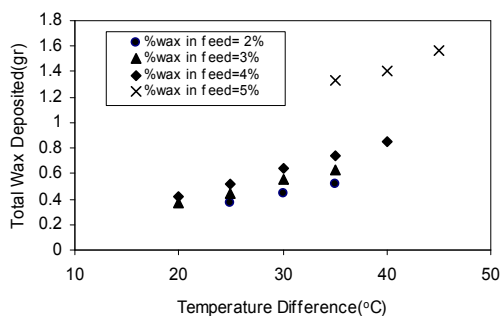
$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \quad (30)$$

$$T(r, 0) = T_{in} = cte$$

$T_0$  دمای ورودی سیال می باشد. لازم به ذکر است این معادله به طریق عددی روش اختلاف محدود و ضمنی حل شده است. برنامه کامپیوتری رسوب واکس در خطوط انتقال، شامل برنامه محاسبات رسوب واکس و زیر برنامه های انتقال حرارت و محاسبات تعادلی دو فازی برشهای نفتی می باشد. فلوجارت این برنامه در ضمیمه (۱) آمده است.

### اختلاف دمای سیال ورودی و جداره لوله

یکی از عواملی که در میزان رسوب واکس اهمیت بسیاری دارد اختلاف دمای بین سیال ورودی و جداره لوله می باشد. نتایج آزمایشگاهی این عامل در نمودار ۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است با افزایش این اختلاف مقدار رسوب افزایش می یابد. البته قابل ذکر است که رسوب واکس در شرایطی تشکیل می شود که دمای سطح لوله از دمای محلول و دمای ابری شدن محلول پایین تر باشد. با افزایش اختلاف دما انتقال حرارت بیشتری صورت می گیرد و با افزایش انتقال حرارت رسوب واکس افزایش می یابد. قابل ذکر است در ابتدا نرخ رسوب واکس بیشتر می باشد اما با افزایش واکس رسوب شده بر روی سطح این نرخ کاهش می یابد. چون بعد از مدتی ضخامت لایه واکس افزایش یافته و این لایه نقش عایق را خواهد داشت و اختلاف دمای موثر را کاهش خواهد داد.



### نمودار ۳- اثر اختلاف دمای ورودی و جداره لوله بر روی رسوب واکس

#### دبی جریان

اثر دبی جریان روی رسوب واکس در نمودار ۴ آمده است. به دلیل تشکیل ذرات بیشتر جامد در برش نفتی در اثر افزایش انتقال حرارت در دبی های بالا با افزایش دبی سیال مقدار رسوب افزایش می یابد. (البته در جریان آرام).

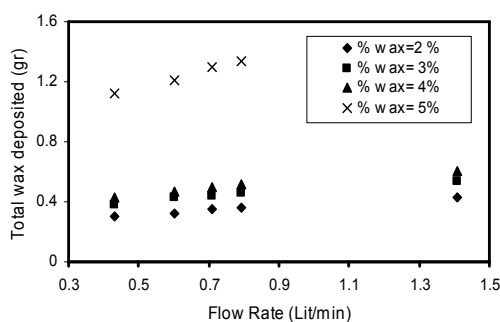
### نمودار ۲- دستگاه مورد استفاده برای آزمایشات رسوب واکس در لوله

لوله مورد نظر از جنس استیل بوده و به منظور اندازه گیری مقدار رسوب در مقطعی از لوله، این لوله به قطعات ۱۰ سانتیمتری تقسیم شد. آزمایشات به طریق زیر انجام شده است: ابتدا برش نفتی خوراک از حل نمودن واکس با درصدهای مختلف در تولوئن ساخته می شود. قابل ذکر است که توزیع جرم ملکولی واکس مورد استفاده در آزمایشات که با استفاده از دستگاه GPC به دست آمده در ضمیمه (۲) آمده است. برش نفتی خوراک را به داخل گرمکن منتقل کرده و سپس جریان سیال سرد را در اطراف لوله استیل برقرار ساخته و در ادامه شیر خروجی گرمکن را باز کرده و خوراک را به داخل لوله استیل پمپ می کنیم. در طول آزمایش باید دمای گرمکن و همچنین دبی ورودی کنترل شود. محلول واکس دار در حین عبور از لوله سرد شده و روی جداره لوله رسوب می کند. بعد از زمان مورد نظر جریان سیال نفتی را قطع نموده و در حالی که جریان سیال سرد برقرار است لوله استیل را از برش نفتی تخلیه می کنیم. پس از تخلیه کامل، قطعات لوله را از هم جدا می نماییم و هر قطعه را با تولوئن گرم شستشو داده و سپس محلول به دست آمده را داخل یک بشر ریخته و بشرها را روی یک المان حرارتی قرار می دهیم تا تولوئن آن کاملاً تبخیر شود و واکس جامد در بشر باقی بماند. بدین ترتیب مقدار رسوب در هر مقطع از لوله و همچنین رسوب کل در لوله را می توانیم با ترازوی دقیق اندازه گیری کنیم.

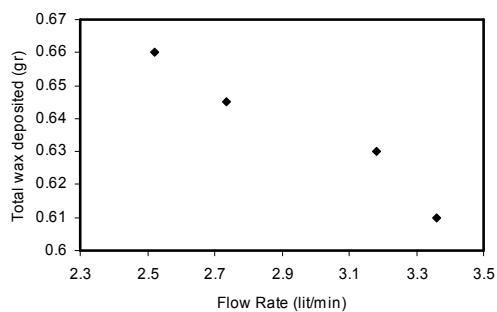
#### نتایج

برای بررسی اثر عامل های موثر بر روی رسوب، آزمایش با تغییر یک عامل و ثابت نگهداشتن بقیه عوامل انجام شد. نتایج حاصل در نمودارها ۳ تا ۸ آمده است.

در جریان در هم با افزایش دبی جریان میزان ، رسوب واکس بر روی جداره لوله کاهش می یابد که این نشان دهنده این واقعیت است که در جریان درهم مکانیزم کنترل کننده دیگری وجود دارد که موسوم به مکانیزم پراکندگی برش می باشد. پراکندگی برش سبب کنده شدن مقداری از رسوب تشکیل شده بر روی جداره لوله و بازگشتن به داخل جریان سیال می باشد. نتایج آزمایشگاهی رسوب در جریان درهم در نمودار ۵ نشان داده شده است.



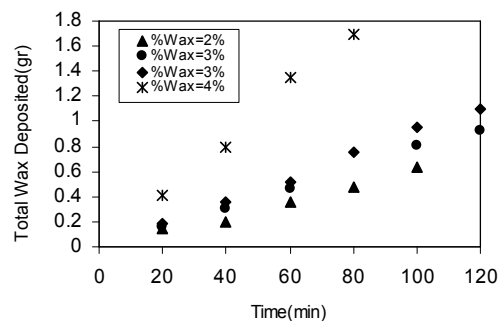
نمودار ۴- اثر دبی جریان سیال ورودی بر مقدار رسوب واکس در جریان آرام



نمودار ۵- اثر دبی سیال ورودی بر روی رسوب در جریان درهم

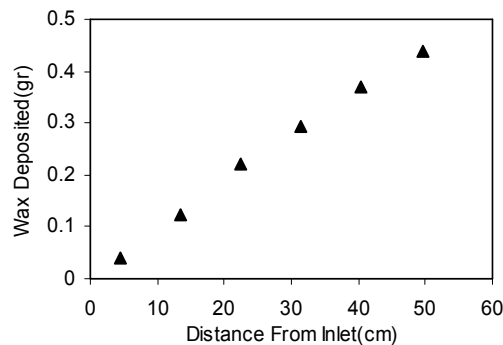
### اثر زمان

اثر زمان بر روی مقدار رسوب واکس در نمودار ۶ نشان داده است. مطابق با انتظار با افزایش زمان مقدار رسوب واکس افزایش می یابد.



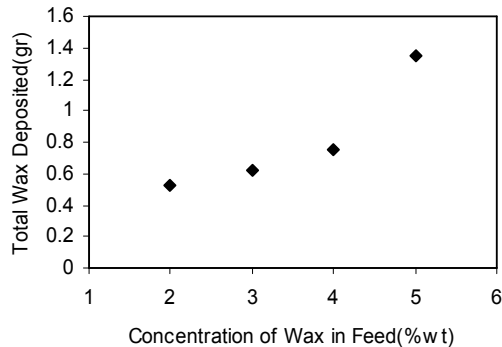
نمودار ۶- اثر زمان بر مقدار رسوب واکس

نمودار ۷ مقدار رسوب واکس را نسبت به طول لوله نشان می دهد. همان گونه که انتظار می رود با افزایش فاصله مقدار رسوب باید افزایش یابد. زیرا هر چه از ورودی لوله دورتر شویم سیال لوله سردتر شده و پتانسیل بیشتری برای رسوب واکس خواهد داشت. نمودار ۸ اثر غلظت واکس موجود در خوراک را در رسوب واکس نشان می دهد. هر چه غلظت واکس در خوراک بیشتر باشد مقدار رسوب بیشتری نیز خواهیم داشت.



نمودار ۷- مقدار رسوب واکس نسبت به طول لوله

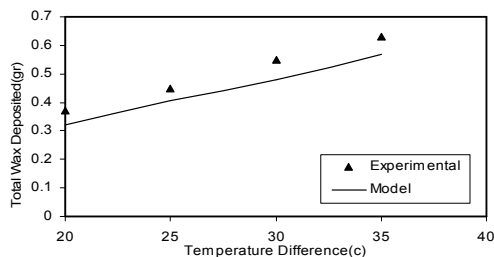




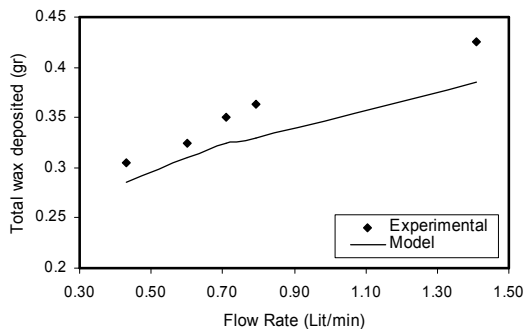
نمودار ۸- اثر غلظت واکس موجود در خوراک روی رسوب واکس

### تطبیق نتایج آزمایشگاهی با پیش بینی های مدل

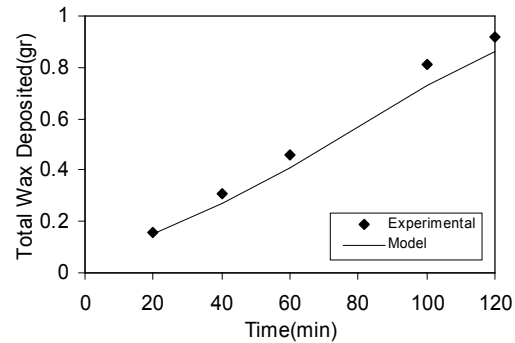
در این قسمت به منظور اطمینان از دقت مدل در پیش بینی مقدار رسوب واکس در لوله، نتایج حاصل از مدل ریاضی و آزمایشات تجربی را با یکدیگر مقایسه کرده ایم. این نتایج در نمودار های ۹ تا ۱۱ آمده است.



نمودار ۹- مقایسه نتایج مدل و آزمایشات تجربی (اثر اختلاف دما) - در دبی ۰.۷۰۸ lit/min

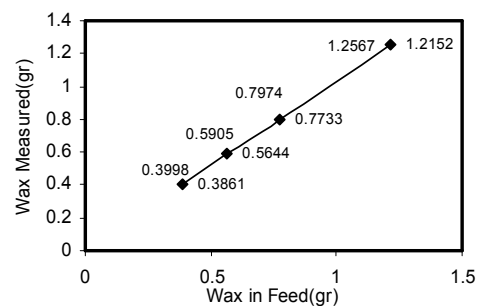


نمودار ۱۰- مقایسه نتایج مدل و آزمایشات تجربی (اثر دبی) - اختلاف دمای سیال ورودی و دیواره ۳۰۰ C



نمودار ۱۱- مقایسه نتایج مدل و آزمایشات تجربی (اثر زمان) - در دبی ۰.۷۹۲ Lit/min و اختلاف دمای سیال و دیواره ۲۵۰ C

همان طور که در نمودار های فوق دیده می شود مدل، مقدار رسوب را ۸ الی ۱۰ درصد کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می کند در اینجا به منظور سنجیدن دقت آزمایشهای تجربی که نتایج آن در قبل آمد آزمایش زیر را انجام دادیم: ۴ نمونه از محلول تولوئن با درصد های مختلف واکس (۲٪، ۳٪، ۴٪، ۵٪) تهیه شد و این محلولها را در بشرهایی ریخته و به طریقه ای که قبلا گفته شد روی المان حرارتی قرار می دهیم تا تولوئن آن تبخیر شود و سپس بشرها را وزن کرده و مقدار واکس داخل بشرها را به دست آوردیم. سپس مقادیر به دست آمده در انتهای آزمایش با مقادیر اولیه اضافه شده مقایسه و نتیجه آن در نمودار ۱۲ مشاهده می شود. با توجه به حدود ۸ تا ۱۰ درصد افزایش که بین نتایج تئوری و مدل نشان داده می شود حدود ۳ تا ۴ درصد آن مربوط به خطای روش اندازه گیری مقدار رسوب واکس می باشد.



### نمودار ۱۲- مقایسه جرم واکس توزین شده پس از خشک کردن محلول و جرم واکس موجود در محلول

دارد که با کاهش دما در یک نقطه، جهشی در گرانشی پیدا می‌شود که این نقطه را نقطه ظهور واکس می‌گویند.

#### نمادها

$D_m$ :	ضریب نفوذ جرمی مخلوط ( $m^2/s$ )
$J$ :	فلاکس جرمی شعاعی ( $kg/ms$ )
$K_i$ :	ضریب تعادلی جامد- مایع جزء $i$
$L$ :	جزء مولی فاز مایع
$MW_i$ :	وزن ملکولی جزء $i$
$q$ :	دبی حجمی سیال ( $lit/min$ )
$R$ :	ثابت گازها ( $J/mol.K$ )
$R_w$ :	شعاع موثر لوله ( $m$ )
$S$ :	جزء مولی فاز جامد
$T$ :	دما ( $K$ )
$T_i^f$ :	نقطه ذوب جزء $i$ ( $K$ )
$V_z$ :	سرعت محوری در لوله ( $m/s$ )
$W_i$ :	جزء، وزنی هر جزء در مخلوط
$W_{ti}$ :	نسبت وزنی هر جزء در فاز جامد
$W_{si}$ :	نسبت وزنی جزء $i$ فاز جامد موجود در مخلوط
$W_s$ :	نسبت وزنی کل کریستالهای واکس در مخلوط
$x_i$ :	کسر مولی جزء $i$ در فاز مایع
$z_i$ :	کسر مولی جزء $i$ در کل مخلوط
$\rho_s$ :	دانسیته جرمی فاز جامد ( $kg/m^3$ )
$\rho_x$ :	دانسیته جرمی فاز مایع ( $kg/m^3$ )
$\rho_m$ :	دانسیته جرمی مخلوط ( $kg/m^3$ )

#### بحث و نتیجه گیری

هدف از انجام این تحقیق، مطالعه بخشی از مشکلات مربوط به تشکیل رسوب مواد آلی سنگین در خطوط انتقال بود. با توجه به این که عمده رسوبات تشکیل شده را واکس و آسفالتین تشکیل می‌دهند نظر خود را روی یکی از این دو یعنی واکس متمرکز ساختیم و با استفاده از مدل های موجود ترمودینامیکی و معادلات ترانسپورت، سعی در تهیه یک مدل کامپیوتری برای پیش بینی مقدار رسوب واکس شد. به منظور صحت نتایج مدل، آزمایشات تجربی انجام گرفت و اثر پارامترهای مختلف از قبیل دما، دبی سیال، زمان و غلظت واکس موجود در خوراک بر روی رسوب واکس بررسی و نتایج زیر حاصل شد:

۱- با افزایش دبی سیال ورودی لوله مقدار رسوب در لوله افزایش می‌یابد (جریان آرام) و این به دلیل آن است که در دبی بالا تر مقدار انتقال حرارت بیشتری صورت گرفته و ذرات جامد بیشتری تشکیل می‌شود که منجر به رسوب آن می‌شود.

۲- هر چه اختلاف دمای بین جداره لوله و سیال ورودی بیشتر باشد مقدار رسوب بیشتر می‌شود و این نیز به دلیل افزایش نرخ انتقال حرارت می‌باشد.

۳- با افزایش زمان مقدار رسوب در لوله بیشتر می‌شود.

۴- هر چه غلظت واکس موجود در خوراک بیشتر باشد پتانسیل این برش برای رسوب بالا رفته و در نتیجه مقدار رسوب در شرایط مطلوب بیشتر می‌شود.

علاوه بر آزمایشات رسوب واکس در لوله گرانشی نمونه‌هایی از خوراکیهای واکس‌دار با غلظت‌های مختلف واکس در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد و این نتیجه بدست آمد که گرانشی برشهای نفتی واکس‌دار بر حسب دما تابعیت نمایی

$\Delta H_i^f$	آنتالپی ذوب جزء مورد نظر (J/mol)
$\gamma_{xi}$	ضریب فعالیت جزء $i$ در فاز مایع
$\gamma_{si}$	ضریب فعالیت جزء $i$ در فاز جامد
$\theta$	نسبت جزء مولی فاز جامد به فاز مایع
$\sigma_i$	عامل بدون بعد در معادله (۱۲)
$\mu$	گرانروی سیال (cP)
$\phi$	ضریب تجمعی

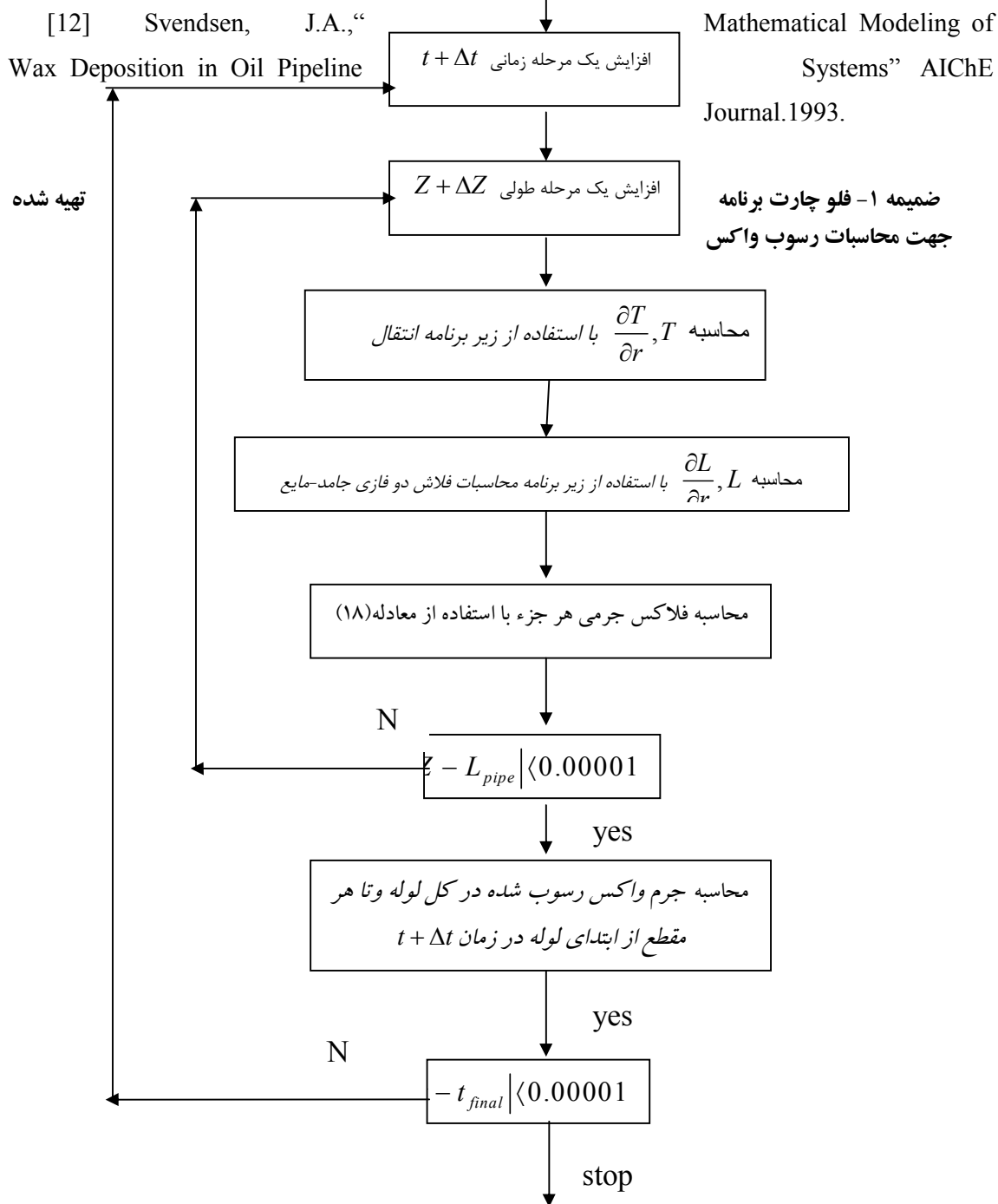
## منابع

- [1] Misra, S., Baruah, S., and Singh, K., "Parafin Problems in Crude oil Production and Transportation : A Review" Society of Petroleum Engineers. Feb. 1995.
- [2] Swetgoff, J., "Parafin Problems Can be Resolved with Chemicals" Oil & gas Journal. Feb. 1984.
- [3] Shock, D.A., Sudbury, J.D., and Crockett, J.J., "Studies of the Mechanisms of Parafin Deposition and its Control" Journal of Petroleum Technology. Dec. 1960.
- [4] Solaimany Nazar. A.R., Dabir. B, Vaziri. H., "Experimental and Mathematical Modeling of Wax Deposition and Propagation in Pipes Transporting Crude Oil" Paper SPE 67328 Presented at the SPE Production and Operations Symposium in Oklahoma City, Oklahoma, 24–27 March, 2001.
- [5] Won, K.W., "Continuos Thermodynamics for Solid Liquid Equilibria : Wax Formation from Heavy Hydrocarbon Mixtures." Paper 27A Presented at AIChE Spring. National Meeting Houston. TX. March, 1985.
- [6] Solaimany Nazar. A.R., Dabir. B., Islam. M.R., "Measurement and Modeling of Wax Deposition in Crude Oil Pipelines" Paper SPE 69425 Presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference in Buenos Aires, Argentina, 25–28 March 2001.
- [7] Parks, C.F., "Chemical Inhibitors Combat Parafin Deposition" Oil & Gas Journal. April. 1966.
- [8] Fernandez, J.A., and Rodriquez, Y.M., "Rheological and Conductometric Properties of Two Different Crude Oil and Their Fractions" Ind. Eng. Chem. Process. Dec. 1984.

[9] Bern, P.A., Withers, V.R., and Carins,R.J.R., “Wax Deposition in Crude Oil Pipelines” European Offshore Petroleum Conference& Exhibition, London, Oct 21-24, 1980.

[10] Burger, E.D., Perkins, T.K., Striegler, J.H., “Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline” Journal of Petroleum Technology, june. 1981.

[11] Asperger,R.G., Sattler, R.E., Tolonen, W.J., and Pitchford, A.C.,” Prediction of Wax Buildup in 24 inch Cold , Deep Sea Oil Loading Line”



ضمیمه (۲) - توزیع جرم ملکولی واکس مورد استفاده در آزمایشات - آنالیز دستگاه GPC

جرم ملکولی	جرم ملکولی متوسط	درصد وزنی
>۷۰۰	۷۰۰	۰،۰۱۳۸۵
۶۷۰-۷۰۰	۶۹۰	۰،۰۱۳۷
۶۶۰-۶۸۰	۶۷۰	۰،۰۱۹۶۶
۶۴۰-۶۶۰	۶۵۰	۰،۰۲۶۸۵
۶۲۰-۶۴۰	۶۳۰	۰،۰۳۴۸۱
۶۲۰-۶۰۰	۶۱۰	۰،۰۴۲۹۲
۵۸۰-۶۰۰	۵۹۰	۰،۰۵۰۱۱
۵۶۰-۵۸۰	۵۷۰	۰،۰۵۵۰۸
۵۴۰-۵۶۰	۵۵۰	۰،۰۵۶۴۶
۵۲۰-۵۴۰	۵۳۰	۰،۰۵۳۰۲
۵۰۰-۵۲۰	۵۱۰	۰،۰۸۶۴۵
۴۸۰-۵۰۰	۴۹۰	۰،۰۷۵۰۵
۴۶۰-۴۸۰	۴۷۰	۰،۰۵۹۵۲
۴۴۰-۴۶۰	۴۵۰	۰،۰۷۹۵۶
۴۲۰-۴۴۰	۴۳۰	۰،۰۵۸۱۴
۴۰۰-۴۲۰	۴۱۰	۰،۰۶۸۱۷
۳۸۰-۴۰۰	۳۹۰	۰،۰۷۱۳

۳۶۰-۳۸۰	۳۷۰	۰۰۰۴۳
---------	-----	-------