آموزش مهندسی و پژوهش مبتنی بر زنجیره ارزش فناوری- مطالعه موردی: مهندسی مخزن در صنعت گاز

رضا آذین[۱]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۱۱

DOI: 10.22047/ijee.2021.215289.1714

چکیده: رویکرد رایج آموزش مهندسی بر پایه تعریف اصول، مبانی، تشریح روابط ریاضی و عددی یک درس استوار است که به‌طور معمول در کتاب‌های درسی آن موضوع به‌خوبی تشریح شده است. مسئله‌های جدید حوزهٔ مهندسی فراتر از یک درس یا یک رشته است و دانش‌آموختگان معمولاً در گروه‌های متشکل از رشته‌ها و حوزه‌های مختلف به تجزیه و تحلیل و حل مسئله‌های چندرشته‌ای و چندبعدی می‌پردازند. برای آمادگی ورود به این عرصه‌ها نیاز است که فراگیران در زمان تحصیل با رویکرد یکپارچه آموزش همگام با پژوهش، تحلیل حساسیت، تفکر بین‌رشته‌ای، توجه به زنجیره ارزش فناوری آشنایی پیدا کنند. در رویکرد جدید، استاد حین تدریس مطالب کلاسیک، جایگاه درس را در منظومه زنجیرهٔ ارزش فناوری مشخص می‌نماید. در این مقاله، ابتدا اهمیت و نیاز به دیدگاه همگرا در آموزش مهندسی مطرح می‌شود. در ادامه، با تمرکز بر درس مهندسی مخزن رشته مهندسی نفت، زنجیره فناوری صنعت گاز معرفی شده و ارتباط مبحث مهندسی مخزن با حوزه‌های مهندسی شیمی، طراحی فرایند، پیوند مبحث‌های مهندسی مخزن با حوزه‌های یادشده با ذکر نمونه‌های واقعی تشریح می‌گردد. در مثال‌های ذکرشده، پس از طرح سؤالات پژوهشی، دانشجو با نتایج پژوهش‌های مرتبط با موضوع تدریس آشنا می‌شود و با مرور یک یا چند پژوهش کاربردی مرتبط با مبحث، روش تحقیق مهندسی را حین تدریس فرا می‌گیرد. مثال‌های ارائه‌شده مربوط به مهندسی مخزن و زنجیره ارزش از مخزن تا پالایشگاه می‌باشند. رویکرد آموزش مهندسی، هم‌راستا با پژوهش به فراگیر قدرت تفکر یکپارچه، شناخت ابعاد مختلف مسئله‌های جدید مهندسی مخزن و درک جامع‌تر از مسئله را به دست می‌دهد.

واژگان کلیدی: آموزش مهندسی، پژوهش، زنجیره ارزش، فناوری‌های نوین، مهندسی مخزن صنعت گاز

۱- دانشیار، دانشگاه خلیج فارس، دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، گروه مهندسی نفت، بوشهر. reza.azin@pgu.ac.ir

۱. مقدمه

در دنیای امروز، علوم و فنون بیش از پیش در هم تنیده شده است و اصول علمی از یک رشته به رشته و گرایشی دیگر منتقل می‌شوند. مفاهیم، مبانی و کاربردها در یک شاخه علم از سایر حوزه‌ها وام گرفته می‌شود و به نوعی یکپارچگی در آنها رخ می‌دهد. با ظهور شاخه‌های جدید علم که به‌صورت هیبریدی از دو یا چند حوزه علمی و بر اساس مسئله‌های جدید به وجود آمده‌اند، مفهوم‌ها، ابزار، و قوانین علمی از یک رشته و گرایش به رشته و گرایش جدید منتقل شده و رشته‌های جدید علوم را همراه با نوآوری خلق می‌کنند. به عنوان مثال، اقیانوس‌شناسی دیرینه به‌عنوان علم مطالعات تغییرات دوره‌های گذشته اقیانوس‌ها، تلفیقی از تغییرات جریان، شیمی و زیست‌شناسی اقیانوس‌ها از حدود یک‌صد میلیون سال قبل است. نوآوری حفاری عمیق اقیانوس‌ها به دانشمندان کمک کرد تا مجموعه‌ای از رسوبات دیرینه را از بستر اقیانوس‌ها گردآوری کنند و توالی زمانی ردیاب‌های ژئوشیمیایی، صدف‌های کوچک موجود در رسوبات را برای تحلیل روند تغییر اقلیم در گذشته و یافتن الگوهای آن مطالعه نمایند (Brockman, 2009). آمادگی برای ورود به این حوزه‌های هیبریدی نیازمند بازنگری در شیوه رایج آموزش علوم و فنون است، به نحوی که دانش‌آموختگان از دانش و مهارت مورد نیاز برای برخورد با مسئله‌های چندبعدیِ نیازمندِ حل با دانشِ بیش از یک رشته برای رشتهٔ خود برخوردار شوند. تمرکز بر مسئله‌های چندبعدی و شناخت رابطهٔ علّی و معلولی میان حلقه‌های پیشین و پسین یک مسئله تخصصی، نیازمند شناخت کامل و تفصیلی از زنجیرهٔ ارزش حوزه مورد مطالعه و بازنگری آموزش متناسب با این شناخت است. بر اساس پیمایش شورای عالی فوروم اقتصادی جهانی، افراد و سازمان‌ها برای ورود به انقلاب صنعتی چهارم نیازمند ده مهارت برتر از جمله مهارت حل مسئله پیچیده، تفکر انتقادی، خلاقیت، هماهنگی با دیگران، قضاوت و تصمیم‌سازی و گفتمان می‌باشند (Nabipour, 2018). این ویژگی‌ها با نگرش یکپارچه و آموزش مبتنی بر زنجیره ارزش در دانشجویان و فراگیران شکل گرفته و تقویت می‌شوند و با تشکیل گروه‌های دانشجویی و تمرکز بر پژوهش‌های درسی به سرپرستی استاد یا دانشجویان تحصیلات تکمیلی در دانش‌آموختگان نهادینه می‌گردند. توسعه فناوری‌های نوین هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی، الگوریتم ژنتیک در حوزه‌های مهندسی نفت، همچون سایر رشته‌های علوم به‌تدریج درحال گسترش است. برخی مبانی و کاربردهای این فناوری‌های نوین در رفتار فازی و ترمودینامیک سیالات مخزن را می‌توان در مقالات محمدی باغملایی و همکاران (Mohamadi-Baghmolaei et al. 2016a, 2016b) مطالعه نمود. بسترهای نرم‌افزاری مهندسی نیز طی سال‌های اخیر بر مبنای تحلیل چندبعدیِ مسئله‌های مهندسی توسعه یافته است. به‌عنوان مثال، نرم‌افزار کامسول[1] پدیده‌ها و مسئله‌های دارای بیش از یک فیزیکی را به‌طور هم‌زمان برای حل یک

1- COMSOL

مسئله مهندسی به کار می‌گیرد. این پدیده‌ها می‌توانند شامل دینامیک سیال[1]، انتقال حرارت، انتقال جرم و سینتیک واکنش باشند. چنانچه دانشجو یا پژوهشگر با مسئله‌های دارای دو یا چند فیزیک هم‌زمان مربوط به یک یا چند رشته مواجه شود، در صورتی توان درک و حل و تحلیل این مسئله‌ها را خواهد یافت که شناخت حداقلی از مفاهیم و مبانی رشته‌های مورد مطالعه داشته باشد. این امر به معنای ورود عمیق فرد در تمام جزییات حوزه‌های تخصصی نیست، بلکه افراد بنا بر نیاز، از حوزهٔ اصلی خود وارد حوزه‌های مجاور علمی می‌شوند. بدین‌سان، نوآوری گاه از انتقال و کاربست مفاهیم و مبانی یک رشته و ادغام در مفاهیم و مبانی حوزه دیگر، برای حل مسئله‌های مرتبط با آن حوزه خلق می‌شود.

در گذر زمان، پرسش‌های جدیدی پیش روی متخصصین و پژوهشگران قرار می‌گیرند که پاسخ‌های جدید و فراتر از رویکردهای کلاسیک می‌طلبد. پایه این رویکردهای جدید بر نگرش یکپارچه و ژرف دانش فناوری، ابزارها و گستره‌های وابسته به فعالیت انسانی است. همگرایی یک اصل بنیادی طبیعت، رهیافتی بنیادین در تفکر، فرایندی تکاملی و غیریکنواخت و فرصتی برای توسعه علم و فناوری در جامعه دانشی است. این رهیافتِ حل مسئله از مرزهای میان‌رشته‌ای گذر می‌کند و فرای مرزهای رشته‌ها و تخصص‌ها، در پی پاسخ‌هایی جامع‌تر است (Nabipour, 2019). بر این اساس، همگرایی علم و فناوری از هفت اصل پیروی می‌کند که شامل وابستگی دوسویه حوزه‌ها[2]، بهبودی در چرخه همگرایی-واگرایی، حل مسئله و تصمیم‌گیری استنتاجی با منطق نظام‌مند[3]، خلق و به‌کارگیری زبان‌های میان حوزه‌های سطح بالا[4]، پژوهش‌های بنیادی الهام‌یافته از چشم‌انداز[5] برای پرداختن به چالش‌های درازمدت است. همگرایی در چارچوب‌های مختلفی مطرح می‌شود. در یک چارچوب متداول، فناوری‌های نوین نانو، زیستی، فناوری اطلاعات و شناختی (NBIC[6]) و در چارچوب دیگر، همگرایی دانش و فناوری (CKTS[7]) برای سودمندی جامعه به معنی یکپارچه‌سازی دانش، فناوری‌ها و جامعه مطرح است. به بیان دیگر، همگرایی علم و فناوری با هدف یکپارچه‌سازی دانش، فناوری و جامعه با هدف بهبود بهره‌وری اقتصادی، افزایش پتانسیل‌های انسانی و تضمین کیفیت زندگی پایدار برای همه مطرح می‌شود. نظریه‌های متعددی برای تبیین همگرایی علوم مطرح می‌شود. از جمله این نظریه‌ها می‌توان به نظریه اصول بنیادی، تئوری خط مجانب پیشرفت و تئوری انقلاب بیرونی اشاره کرد (Nabipour, 2019). باید توجه داشت که همگرایی علم و فناوری فراتر از تیم‌سازی میان‌رشته‌ای و انجام مطالعات و پروژه‌های میان‌رشته‌ای است. این رویکرد نیازمند تحول در زیست‌بوم‌های جدید در طراحی پژوهش، تولید و همکاری است تا با ایجاد پلی بین حوزه‌های گوناگون، به زایش عرصه‌های

1- Fluid dynamics
2- Exploiting interdependence among domains
3- System-logic deductive decision making and problem solving
4- High-level cross-domain languages
5- Vision-inspired basic research
6- Nano, bio, information, and cognitive (NBIC) technologies
7- Convergence of knowledge and technology (CKCT)

نوین بیانجامد. صنعت نفت و گاز به‌عنوان مهم‌ترین رکن اقتصادی کشور، برای به‌روز ماندن و پویایی نیازمند درک و به‌کارگیری رویکردهای جدید علم و فناوری همگام با دنیا است. باید توجه داشت که با وجود تبیین اصول بنیادین همگرایی علم و فناوری در برخی حوزه‌های نوین و کاربردی، این اصول در حوزه‌های کلاسیک مهندسی همچون مهندسی نفت، مهندسی مخازن هیدروکربنی جاری نشده است. رویکردهای موجود آموزش مهندسی در این حوزه‌ها، همچون گذشته بر پایه سرفصل‌های مجزا و بدون توجه به زنجیره ارزش فناوری و به دور از فعالیت‌ها و مطالعات میان‌رشته‌ای استوار است. این درحالی است که گذار دانشگاه‌ها از نسل دوم به نسل سوم و حرکت به سوی دانشگاه کارآفرین، مطابق با اسناد بالادستی مصوب وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، نیازمند بازنگری اساسی در سرفصل‌ها و آشنایی مدرسین با حوزه‌های میان‌رشته‌ای است.

در این مقاله، ابتدا زنجیره ارزش مهندسی گاز و ارتباط آن با برخی حوزه‌های مهندسی تشریح می‌شود و در ادامه، آموزش مهندسی مخزن در ارتباط با حوزه‌های دیگر علوم با ذکر مثال‌های کاربردی مورد بحث قرار می‌گیرد. در بخش بعدی، تحلیل مسئله‌های مهندسی مخزن در حین آموزش و بیان مسئله‌های کلاسیک مهندسی مخزن در رویکردها و مسئله‌های نوین با طرح پرسش‌های پژوهشی و تشریح ارتباط آن با سایر علوم مهندسی به بحث گذاشته می‌شود. در این فرایند، دانشجویان ضمن آشنایی با مبانی و ابعاد رشته تحصیلی و ارتباط آن با سایر شاخه‌های زنجیره ارزش صنعت، آمادگی ضمنی برای تعامل میان رشته‌ای با سایر حوزه‌های تخصصی در محیط کار را به‌دست می‌آورند. رویکرد این مقاله بیشتر بر مبنای بیان تجربیات توأم آموزشی و پژوهشی است. در بخش‌های بعدی این مقاله سعی شده تا با طرح مثال‌های جدید و کاربردی، مواردی همچون زمینه‌های پژوهشی، تفکر انتقادی، طرح سؤالات جدید، یادگیری آموزش همراه با پژوهش، تحلیل حساسیت، تفکر بین‌رشته‌ای، توجه به زنجیره ارزش فناوری در زمان تحصیل مطرح گردد. همچنین، با عنایت به توجه مدرسین به مرتبط کردن مطالب درسی با مسائل پژوهشی و فناوری در تدریس دروس مهندسی، مثال‌های ارائه‌شده در این مقاله رویکردهای جدیدی را مبنی بر طرح سؤالات جدید بر پایه تفکر بین‌رشته‌ای و توجه به زنجیره ارزش فناوری صنعت گاز نیز ارائه داده است که برای ورود مدرسین آشنا به حوزه‌های میان‌رشته‌ای راهگشا است.

۲. زنجیره فناوری صنعت گاز

ایران کشوری با منابع گازی فراوان است. میدان‌ها و مخزن‌های گازی ایران به‌طور عمده در جنوب و جنوب غرب کشور، در محدوده خشکی و فراساحل استان بوشهر (حدود ۷۵٪)، و به‌میزان کمتری در جنوب استان فارس و شمال شرق خراسان رضوی واقع است. مهم‌ترین میدان‌های گازی مشترک ایران در خشکی، میدان گنبدلی مشترک با ترکمنستان و در خلیج فارس و دریای عمان شامل پارس

جنوبی، سلمان، مبارک، فارس و آرش به‌ترتیب با کشورهای قطر، امارات متحده عربی، عربستان سعودی و کویت مشترک است. به‌علاوه، مهم‌ترین میدان‌های گازی مستقل ایران شامل نار و کنگان، سرخون و قشم، آغار و دالان، کاکی، پارس شمالی، فردوسی، گلشن، تابناک، شانول، عسلویه، کبیرکوه و... می‌باشد (Osfouri et al., 2017). زنجیره فناوری صنعت گاز شامل بخش‌های بالادستی، میان‌دستی و پایین‌دستی است (شکل ۱). بخش بالادستی زیرمجموعه مهندسی نفت است و شامل حوزه‌هایی همچون اکتشاف، زمین‌شناسی، پتروفیزیک، مهندسی مخزن، تجهیزات سطحی، رفتار فازی هیدروکربن‌ها، حفاری، بهره‌برداری و اقتصاد است. بخش میان‌دستی شامل خطوط انتقال و ایستگاه‌های تقویت فشار است. در بخش پایین‌دستی فرایندهای پالایش و فراوری گاز از جمله نم‌زدایی، شیرین‌سازی، تفکیک گاز و... در قالب پالایشگاه‌های گاز فعالیت می‌کنند. در این میان، حوزه‌های مهم میان‌رشته‌ای مهندسی مانند ایمنی، سلامت، محیط زیست، خوردگی، بازرسی فنی، اندازه‌گیری دبی گاز[1] و اقتصاد مهندسی در تمام سطوح زنجیره ارزش صنعت گاز، نقشی کلیدی در نگهداری تجهیزات صنعت ایفا می‌کنند. از این‌رو، حوزه مهندسی مخزن در یک چارچوب بزرگ‌تر به نام صنعت گاز قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که در تفکیک و قرار دادن حوزه‌های مختلف زنجیره ارزش صنعت گاز در یکی از بهش‌های بالادستی، میان‌دستی و پایین‌دستی اتفاق نظر وجود ندارد. به بیان دیگر، یک حوزه از نظر بخشی از صنعت می‌تواند بالادستی قلمداد شود و همان حوزه از دیدگاه سایر بخش‌های صنعت گاز، می‌تواند میان‌دستی یا پایین‌دستی تعریف شود. موضوع مشترک مهم از دیدگاه کلان آن است که هر یک از حوزه‌های ذکرشده در شکل ۱ می‌تواند روی حوزه‌های دیگر زنجیره ارزش تأثیر بگذارد. از این دیدگاه، کلیت زنجیره ارزش صنعت گاز به مثابه یک موجود زنده است که عملکرد و هر نوع تغییر در عملکرد یک بخش، روی سایر بخش‌ها تأثیر می‌گذارد. درک چگونگی تأثیرگذاری این حوزه‌ها بر یکدیگر، بستگی به شناخت دانشجو، مهندس و مدرس از زنجیره ارزش کامل صنعت، آشنایی با عملیات و فرایندهای هر بخش، شناخت ارتباط بین حوزه‌ها و عوامل مؤثر بر کارکرد و بازده هر حوزه دارد. مهندس نفت به واسطه شناخت همگرا از زنجیره ارزش صنعت گاز، قادر به درک اهمیت تصمیم‌های عملیاتی بر عملکرد واحدهای پایین‌دست خواهد بود. در این راستا مهندس نفت و دانشجوی مهندسی نفت نیازمند شناخت مفاهیم مهندسی از رشته‌هایی همچون مهندسی شیمی و مهندسی مکانیک است. درک تفاوت مفهومی اصطلاحات و معنای متفاوت یک اصطلاح در رشته‌های مختلف، به درک یکپارچه زنجیره ارزش صنعت کمک زیادی می‌کند. این نگرش یکپارچه از اواخر دهه ۱۹۸۰ میلادی در مطالعات توسعه میدان[2] و مطالعات یکپارچه مخزن[3] تجربه و به‌کار گرفته شده است. اصول و مبانی مطالعات یکپارچه مخزن توسط کوزنتینو تشریح شده است (Cosentino,2001). در مطالعات یکپارچه مخزن،

1- Metering 2- Field development 3- Integrated reservoir studies

تمرکز اصلی بر بخش اول زنجیره ارزش (بالادستی) است، در حالی که در مطالعات همگرای توسعه میدان، می‌توان انتظار داشت که مؤلفه‌هایی از بخش‌های میان‌دستی و پایین‌دستی هم مطالعه شوند. از این‌رو نیاز است که دانشجوی مهندسی نفت، آموزش مهندسی در حین تحصیل را همراه با پژوهش و با رویکرد مطالعات توسعه میدان و نگرش یکپارچه مبتنی بر زنجیره ارزش صنعت نفت و گاز فراگیرد.

شکل ۱. زنجیره فناوری صنعت گاز

مثال ۱: تغییرات رفتار فازی سیال با زمان

شناخت رفتار فازی سیال مخزن[1] یکی از گام‌های نخستین مطالعهٔ مخزن است. این مبحث تأثیر مستقیم بر درک جریان سیال در محیط مخزن، جریان سیال در چاه، طراحی تأسیسات سرچاهی و خطوط لوله انتقال سیال دارد (Osfouri et al., 2017). چنانچه دانشجویان اهمیت این مبحث را در طراحی، بهره‌برداری و بهینه‌سازی پالایشگاه درک نمایند و نگرش یکپارچه‌ای نسبت به تأثیر تغییرات رفتار فازی سیال مخزن بر عملکرد پالایشگاه پیدا کنند، درمی‌یابند که تغییر ترکیب و شدت جریان خوراک ورودی به پالایشگاه، متأثر از تغییرات رفتار فازی سیال مخزن، تغییر فشار مخزن، جدایش فازهای سیال در مخزن و پدیده‌های مرتبط با آن است. بروز برخی پدیده‌ها در پالایشگاه بدون شناخت عوامل و متغیرهای بالادستی امکان‌پذیر نیست. همچنین، شرایط بهینه عملیات پالایشگاه که در زمان طراحی بر مبنای مشخصات خوراک اولیه ورودی به کارخانه تعیین شده است، با گذشت زمان و تغییر دبی و مشخصات خوراک تغییر می‌کند. تغییر مشخصات خوراک با زمان به‌صورت تغییر در ترکیب درصد گاز، نسبت میعانات به گاز[2]، نقطه شبنم[3]، ترش شدن تدریجی گاز شیرین با افزایش میزان سولفید هیدروژن، بروز می‌کند. همهٔ این عوامل روی رفتار فازی گاز تأثیر می‌گذارد. از این‌رو، انتظار

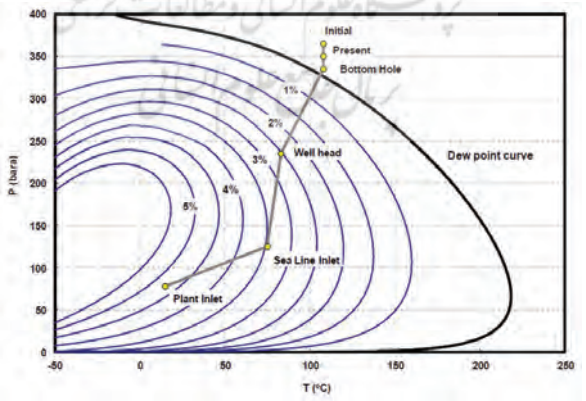
1- Reservoir fluid phase behavior 2- Condensate to gas ratio (CGR) 3- Dew point

می‌رود که نمودار رفتار فازی گاز (شکل ۲) با زمان تغییر کند. بهره‌بردار با درک این واقعیت می‌تواند شرایط عملیاتی واحدهای پالایشگاه را تصحیح کند. دانشجویان مهندسی شیمی و نفت باید بتوانند اهمیت تغییرات رفتار فازی با زمان را در طراحی و بهینه‌سازی نقطه عملیاتی واحدهای پالایشگاهی، تعیین رژیم جریان در چاه، خطوط لوله و انتقال سیال، تغییر نقطه بهینه عملکرد جداسازهای سرچاهی[1]، بهینه‌سازی مصرف انرژی واحدهای فرایندی و نشر کربن از پالایشگاه و تأسیسات سرچاهی را درک و پیاده‌سازی کنند. تشریح این مطالب در کلاس درس و کارگاه‌های آموزشی افق دید دانشجو و فراگیران را بازتر می‌سازد. این امر مشروط به درک یکپارچه از حوزه‌های مهندسی مخزن، مهندسی شیمی و فرایند و رویکرد مدرس در تدریس همگرای این مفاهیم و کاربردها است. این درک یکپارچه همراه با شناخت تفاوت مفاهیم، اصطلاحات و معنی آنها در حوزه‌های فوق است. به عنوان مثال، مفهوم کیفیت[2] در سیستم‌های دوفازی گاز-مایع در ترمودینامیک مهندسی شیمی و مهندسی مخزن، با دو رابطه متفاوت تعریف می‌شود. معادله (۱) کیفیت در مهندسی شیمی و معادله (۲) کیفیت سیال مخزنی را تعریف می‌کند:

$$x = \frac{n_v}{n_t} \qquad (۱)$$

$$x = \frac{n_l}{n_t} \qquad (۲)$$

در معادله‌های بالا، nv مقدار مول بخار، nl مقدار مول مایع، nt مجموع مقدار مول مایع و بخار است. همان‌طور که دیده می‌شود، یک اصطلاح واحد با کاربردی نسبتاً مشابه (مقدار فاز دوم در فاز اول) ولی با تعریف کاملاً متفاوت در دو حوزه مهندسی شیمی و مهندسی مخزن به‌کار برده می‌شود.



شکل ۲. رفتار فازی سیال گاز میعانی (لک و همکاران، ۲۰۱۴)

1- Wellhead separator 2- Quality

مثال ۲: درک اقتصادی از مطالعات مخزن

مهندسی نفت و مخازن هیدروکربنی ارتباط نزدیکی با مباحث اقتصاد و اقتصاد مهندسی دارد. دانشجویان به‌طور معمول مبحث‌های اقتصادی را جدا از موضوعات فنی فرا می‌گیرند. تجربه نشان داده است که آشنایی و به‌کارگیری موضوعات ابتدایی و کاربردی اقتصاد مهندسی حین فراگیری مبانی مهندسی مخزن، به درک جامع‌تر فراگیر از اقتصاد مخزن کمک می‌کند. به عنوان مثال، دانشجو هم‌زمان با محاسبه حجم نفت، با مساحت، ضخامت لایه مخزنی، تخلخل، حجم نفت درجا[1]، حجم نفت قابل‌برداشت[2] در مراحل برداشت اول[3]، دوم[4] و سوم[5] از مخزن و عدم‌قطعیت در خواص سنگ و سیال نیز سروکار خواهد داشت. چنانچه این مفاهیم با ابزارهای اقتصادی مثل قیمت نفت، نوسانات آن با زمان و تأثیر آن بر اقتصاد مخزن ترکیب شود و تحلیل‌های اقتصادی ابتدایی با تدریس مبانی مهندسی مخزن ترکیب شود، درک کامل‌تری از موضوع به فراگیر می‌دهد. از جمله تحلیل‌های ساده اقتصادی مرتبط با موضوع مهندسی مخزن، می‌توان به روند قیمت نفت، ارتباط قیمت نفت با چگالی (یا درجه API)، ارزش بالقوه اقتصادی ذخیره هیدروکربوری مخزن و ارزش اقتصادی حجم نفت برداشت‌شده از مخزن اشاره کرد. معادله (۳) میزان نفت اولیه درجا در یک مخزن و معادله (۴) برای محاسبه ضریب بازیابی هیدروکربن از مخزن به کار می‌روند.

$$N = \frac{43560 A h \varnothing (1 - S_{wc})}{B_{oi}} \qquad (۳)$$

$$RF\% = \frac{N_p}{N} \qquad (۴)$$

می‌توان ضریب بازیابی (معادله ۴) را با قیمت نفت ترکیب کرد تا به ارزش اقتصادی هیدروکربن تولیدشده و قابل‌تولید پی برد (معادله‌های ۵ و ۶):

$$ROV(\$) = OP\left(\$/_{STB}\right) \times N \qquad (۵)$$

$$PHV(\$) = OP\left(\$/_{STB}\right) \times N \times \frac{RF}{100} \qquad (۶)$$

در این معادلات، ROV[6] ارزش نفت مخزن و PHV[7] ارزش هیدروکربن تولیدشده از مخزن است. خواننده گرامی استحضار دارد که در این روابط از ارزش گاز تولیدی همراه نفت صرف‌نظر شده است و تمرکز بر قیمت نفت می‌باشد. درصورت نیاز می‌توان ارزش گاز تولیدی و ارزش گاز مانده در مخزن را با ادغام معادلات موازنه مواد (Azin et al., 2007) با مبانی اقتصادی به معادلات بالا اضافه کرد. دانشجو

1- Original oil in place (OOIP)
2- Recoverable oil
3- Primary oil recovery
4- Secondary oil recovery
5- Tertiary oil recovery
6- Reservoir oil value
7- Produced hydrocarbon value

در این مرحله نیاز به ورود عمیق‌تر به مباحثی چون طرح روندهای قیمت نفت، سناریوهای تولید هیدروکربن با زمان، ارزش زمانی پول، و مفاهیم مفصل‌تر اقتصاد مهندسی ندارد.

مثال ۳: جریان سیال در محیط متخلخل

معادله دارسی (معادله ۷) پایه جریان سیال در محیط متخلخل است که در سال ۱۸۵۶ توسط هنری دارسی مهندس هیدرولیک فرانسوی به‌شیوه آزمایش ارائه شد. دارسی این آزمایش‌ها را برای جریان تک‌فاز آب در بستر ماسه‌ای[1] طراحی کرد و انجام داد. در ساده‌سازی محیط متخلخل، معمولاً از یک دسته لوله مویین استفاده می‌شود و معادله پوازو (معادله ۷) برای تشریح جریان در لوله مویین به‌کار می‌رود. تشریح قانون پوازو نیازمند درک مفهوم مویینگی، فشار مویینه، شرط وجود فشار مویینه (دوفاز بودن سامانه سیال) نیروهای پیوستگی و چسبندگی است.

$$q = -\frac{KA}{\mu}\frac{dp}{dn} \qquad (۷)$$

$$Q = \frac{\pi r^4 \triangle P}{8\mu L} \qquad (۸)$$

معادله دارسی برای تشریح جریان سیال در محیط متخلخل در حوزه‌های متعدد و متنوع مهندسی کاربرد دارد. از آن جمله می‌توان به مهندسی نفت و جریان سیال هیدروکربنی در مخزن، آب‌خیزداری و جریان آب در آب‌ده زیرزمینی، نشت آلودگی به خاک، جریان سیال از غشاء، مهندسی ژئوتکنیک و عمران و ... نام برد. در تدریس مفهومی معادله دارسی با اشاره به توانمندی‌ها، قابلیت و اهمیت این معادله، مبانی تجربی و فرضیات آن تشریح می‌شود. در عین حال به اصلاحیه‌های بعدی معادله دارسی و توسعه و تعمیم آن به حالت‌هایی از مسئله که فراتر از شرایط آزمایش‌های اولیه دارسی بوده، اشاره می‌شود. این حالت‌ها شامل تعمیم آزمایش دارسی به انواع سیال (تراکم‌ناپذیر، تا حدی تراکم‌پذیر، تراکم‌پذیر)، انواع رژیم‌های جریان (آرام[2]، گذار[3]، آشفته[4]، پایا[5]، شبه‌پایا[6]، ناپایا[7]) و انواع هندسه جریان (خطی، شعاعی، کروی، نیمه‌کروی) می‌باشد. به‌علاوه، با اشاره به مشابهت شکلی و مفهومی میان معادله دارسی با معادلات مشابه در سایر حوزه‌های مهندسی (برق، مکانیک، شیمی)، مفهوم گرادیان و نیروی محرکه در معادله دارسی تشریح می‌گردد. درک این مفهوم می‌تواند شروع طرح سؤالات و انجام پژوهش‌های میان‌رشته‌ای در حوزه مهندسی مخزن باشد، چرا که نحوه تفکر در پدیده جریان سیال در محیط متخلخل، یک راهبرد بنیادی و یکپارچه در طبیعت است. از سوی دیگر، معادله ناویر-استوکس

1- Sand pack
2- Laminar
3- Transition
4- Turbulent
5- Steady-state
6- Pseudo-steady state
7- Unsteady state

برای تشریح جریان ماکروسکوپی به‌کار می‌رود. ثابت شده است که معادله دارسی با وجود ماهیت تجربی آن قابل‌استخراج از معادله پایه ناویر استوکس است (Saidi, 2013). همچنین اهمیت نیروی موییـنه در طبیعت (مثل رشد گیاهان)، تفاوت نیروهای موییـنه با نیروهای ویسکوز در تشریح و فرموله کردن جریان ماکروسکوپی در لوله‌ها (معادلات ناویر-استوکس، برنولی، ...) در مکانیک سیالات، برای دانشجویان مهندسی مخزن اهمیت زیادی دارد. به‌علاوه، ذکر تاریخچه‌ای از زندگی حرفه‌ای دارسی و مسیر حرفه‌ای وی در حوزه دانش مهندسی هیدرولیک، در کنار تشریح اتمسفر علمی که شخصیت علمی دارسی را شکل داد (Brown, 2002)، برای شناخت مسیر و تبیین روش علمی به دانشجو کمک می‌کند.

به‌رغم کاربرد گسترده معادله دارسی در علوم، ثابت شده است که این معادله در بازه محدودی کاربرد دارد و در خارج از این بازه دچار انحراف می‌شود. بیشتر مطالعات مربوط به انحراف از جریان دارسی، به سرعت‌های بالای جریان‌وگذار از رژیم جریان آرام[1] به گذار[2] و آشفته[3] مربوط می‌شود که در ادبیات مهندسی مخزن، به جریان غیردارسی[4] معروف است. در سال‌های اخیر مشخص شده است که انحراف از جریان دارسی در محیط متخلخل، محدود به سرعت‌های بالا نیست، بلکه جریان سیال در سرعت‌های خیلی کم نیز از معادله دارسی پیروی نمی‌کند. آزمایش‌های متعددی در مقیاس بستر ماسه‌ای و سیلاب‌زنی مغزه[5] برای تعیین آستانه شروع جریان دارسی و تفاوت آن با جریان پیش‌دارسی[6] انجام شده است (Farmani et al., 2018, 2019). دانشجوی مهندسی نفت نیازمند شناخت و درک محدودیت‌های معادله دارسی به‌رغم کاربردهای گسترده آن می‌باشد.

مثال ۴: معادله نفوذپذیری

رفتار پویای[7] مخزن هیدروکربنی درحال‌تولید با حل معادله نفوذپذیری در مخزن (معادله ۹) بررسی می‌شود (Azin et al., 2016). این معادله با نوشتن قانون بنیادی بقای جرم در یک مخزن هیدروکربنی دارای سیال نسبتاً تراکم‌پذیر با چگالی متغیر با فشار به‌دست می‌آید.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial r} + c\left(\frac{\partial p}{\partial r}\right)^2 = \frac{1}{\eta}\frac{\partial p}{\partial t} \qquad (۹)$$

معادله نفوذپذیری کاربرد گسترده‌ای در مهندسی نفت دارد و مبنای محاسبات مخزنی، چاه‌آزمایی، شبیه‌سازی مخزن و... است. این معادله با اعمال یک‌سری فرضیات از حالت معادله دیفرانسیل

1- Laminar flow
2- Transition flow
3- Turbulent flow
4- Non-darcy flow
5- Core flooding
6- Pre-darcy flow
7- Dynamic

غیرخطی، به فرم ساده‌شده معادله نفوذپذیری خطی (معادله ۹) تبدیل می‌شود. شکل ریاضی معادله نفوذپذیری و روش به‌دست آوردن آن، مشابه با قانون دوم فیک در مهندسی شیمی است که آن نیز بر پایه قانون بقای جرم به‌دست آمده است. به‌علاوه، توزیع دما در سازوکار انتقال حرارت رسانایی برای یک جسم با هندسه مشابه نیز از نوشتن قانون بقای انرژی و حل معادله دیفرانسیل مشابه با معادله (۹) به‌دست می‌آید. مشابهت مفهومی، روش رسیدن به معادله (۹)، شرط‌های مرزی و اولیه یکسان و حل این معادله دیفرانسیل جزیی مشابه با رشته‌های مهندسی متناظر به دانشجو کمک می‌کند تا یکپارچگی علوم مهندسی را بهتر درک کند و مهیای پژوهش‌های میان‌رشته‌ای مهندسی شود. لیکن باید توجه داشت که فرضیات ساده‌کننده معادله نفوذپذیری، همواره نیازمند بررسی و تحلیل پیش از به‌کارگیری است. آذین و همکاران تحلیل جامعی روی درستی فرضیات ساده‌کننده این معادله در سامانه‌های مختلف هیدروکربنی ارائه داده‌اند (Azin et al., 2016). تجربه کار و گفتگوی نگارنده در محیط صنعتی، نشان داده است که بسیاری از متخصصین مخزن، شکل ساده‌شده معادله نفوذپذیری را بدون توجه به پیش‌فرض‌های ساده‌کننده آن در محاسبات مخزنی به‌کار می‌گیرند. این امر نشان‌دهنده اهمیت تشریح محدودیت‌های این معادله حین تدریس آن است. به‌عنوان مثال، مخاطب می‌تواند با تحلیل حساسیت روی مقدار عبارت غیرخطی‌کننده معادله نفوذپذیری، $\left(\frac{\partial P}{\partial r}\right)^2$، اهمیت آن را در زمان به‌کارگیری معادله نفوذپذیری در سامانه‌های مختلف هیدروکربنی درک کند و با آگاهی نسبت به حذف آن یا حفظ آن در معادله نفوذپذیری اقدام کند. به‌ویژه زمانی که جریان سیال در مخزن گازی رخ می‌دهد، حذف این عبارت باید با احتیاط بیشتری انجام شود.

با اعمال شرایط مرزی مختلف روی معادله نفوذپذیری، می‌توان توزیع فشار در مخزن در رژیم‌های جریان ناپایا و شبه‌پایا را به‌دست آورد. زمان‌گذار رژیم جریان از حالت ناپایا به شبه‌پایا از معادله (۱۰) به‌دست می‌آید (Azin et al., 2007):

$$t_{pss} \approx \frac{1200\varnothing\mu c_t r_e^2}{k} \qquad (۱۰)$$

با انجام تحلیل حساسیت روی خواص مخزنی مؤثر بر زمان‌گذار T_{pss}، می‌توان جدولی مشابه جدول ۱ ایجاد نمود. این جدول نکات مهمی از تأثیر خواص سنگ و سیال بر زمان گذار از رژیم جریان حالت ناپایا به شبه‌پایا و تقریبی از مقدار T_{pss} در مخزن‌های مختلف به مخاطب می‌دهد. به‌عنوان مثال، در ردیف اول مشخصات مخزن، می‌توان تأثیر تراوایی را بررسی کرد. با انجام تحلیل حساسیت روی این متغیر، مقدارهای خیلی کم تراوایی که جزء ویژگی‌های مخازن کربناته (ستون ۴)، به‌خصوص در سازندهای ایرانی است، مقدار T_{pss} در این مخازن با مخازن غیرکربناته است، مقایسه و تحلیل می‌شوند. به‌علاوه، ارزش وجودی شکاف در سرعت دادن تولید از مخازن کربناته با تحلیل مقدار T_{pss} و مقایسه آن

بین مخازن مختلف تحلیل می‌شود. همچنین، معرفی پدیده‌های کلاسیک مثل همرفت[1] در مخازن شکاف‌دار طبیعی و ارتباط همین پدیده در حوزه‌های مهندسی، نظیر مهندسی شیمی و مکانیک به دانشجو کمک می‌کند تا ارتباط بهتری میان مباحث آموخته‌شده در درس‌های مختلف برقرار کند. همچنین، در ردیف چهارم، تأثیر گرانروی سیال بر مقدار T_{pss} در مخزن‌های مختلف، از جمله مخزن نفت سنگین (ستون ۲) با مخزن گازی (ستون ۳) محاسبه و تحلیل می‌شود. خواننده گرامی استحضار دارد که در این تحلیل، باید ویژگی‌های سنگ و سیال هر یک از مخازن به‌طور کلی بررسی شود. لیکن این تحلیل ساده در این مقطع تحصیلی به دانشجو دیدگاهی مبتنی بر پژوهش حین آموزش می‌دهد و راه را برای طرح سؤالات پژوهشی و جستجوی پاسخ آن‌ها باز می‌کند.

جدول ۱. تحلیل حساسیت خواص سنگ و سیال مخزن روی T_{pss}

مشخصات مخزن	مخزن ۱ (نفت معمولی)	مخزن ۲ (نفت سنگین)	مخزن ۳ (مخزن گازی)	مخزن ۴ (مخزن کربناته)	مخزن ۵ ...	مخزن ۶ ...	مخزن ۷ ...
تراوایی							
تخلخل							
تراکم‌پذیری کل							
گرانروی سیال							
شعاع مخزن							

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

مثال ۵ : ضریب پوسته[2] ، ضریب بهره‌دهی[3] و رابطه بهره‌وری جریان[4]

مفهوم پوسته در مهندسی مخزن برای تشریح روند غیرعادی تغییرات فشار با شعاع در مخزن تعریف می‌شود. چنان‌چه ناحیه اطراف چاه در مخزن دچار تخریب[5] یا تحریک[6]شده باشد، به‌طوری‌که ناحیه نزدیک به چاه دارای تراوایی متفاوتی از متوسط مخزن باشد، در اصطلاح مهندسی مخزن به پدیده پوسته مشهور است. افت فشار سازند در ناحیه آسیب‌دیده یا تحریک‌شده نزدیک چاه با افزودن ضریب پوسته به معادله افت فشار محاسبه می‌شود. ضریب پوسته را می‌توان بر مبنای داده‌های تولید از چاه محاسبه کرد و بر مبنای عدد به‌دست‌آمده از محاسبات، منشاء احتمالی آن را تشخیص داد. همچنین، ضریب بهره‌دهی برای بررسی توان تولید هیدروکربن از چاه در رژیم

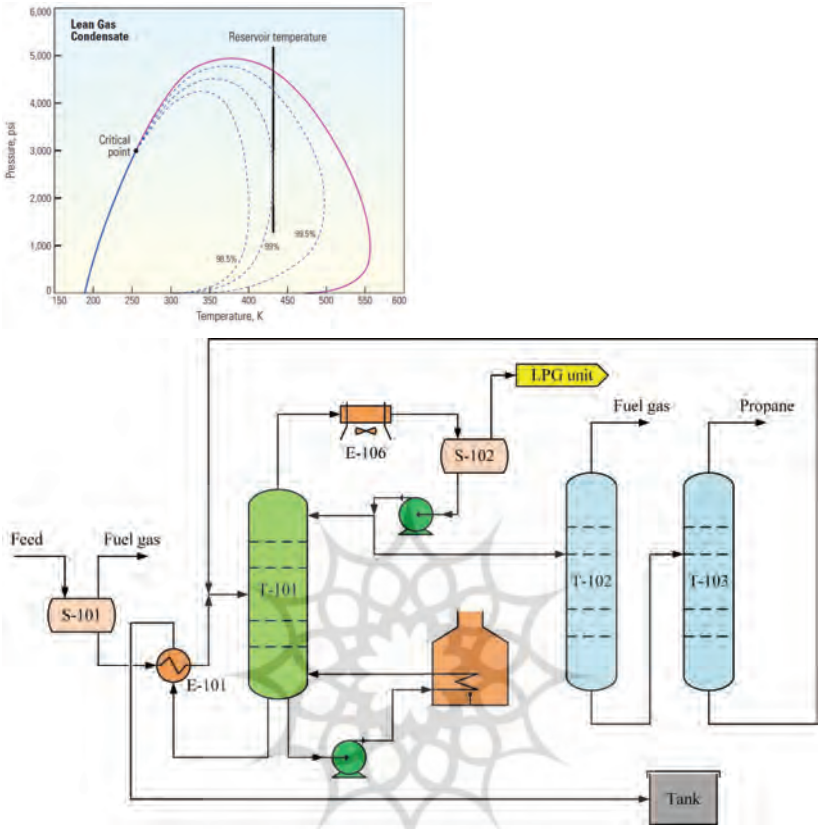
1- Convection
2- Skin
3- Productivity index (PI)
4- Inflow performance relationship (IPR)
5- Damage
6- Stimulation

جریان شبه‌پایدار و با استفاده از اختلاف فشار متوسط مخزن و فشار ته‌چاهی به‌کار می‌رود. این دو مفهوم به تفصیل در کتاب‌ها و منابع مهندسی مخازن هیدروکربنی و بهره‌برداری تشریح شده است. تجربه نشان داده که ارائه تحلیل‌های مهندسی حاصل از پژوهش مبتنی بر داده‌های میدانی تولید مخازن و چاه‌های نفت و گاز حین تدریس، به دانشجویان دیدگاهی واقعی از کاربرد مفاهیم مهندسی تدریس‌شده در کلاس می‌دهد. با این ترتیب، دانشجو کاربرد این مفاهیم را در عمل ملاحظه و تجربه می‌کند. نمونه‌ای از محاسبات و تحلیل نتایج پوسته و ضریب بهره‌وری در یکی از چاه‌های گازی پارس جنوبی در مقاله آذین و همکاران ارائه شده است (Azin et al., 2018). یافته این مطالعه نشان داد که پدیده جاماندن میعانات[1] حین تولید گاز در دیواره اطراف چاه به احتمال زیاد دلیل وجود ضریب پوسته قابل‌توجه در این چاه است. در همین مقاله، نحوه رسم نمودار رابطه بهره‌وری جریان و تغییرات آن با زمان و افت فشار مخزن به‌دقت بررسی و تحلیل شده است و می‌تواند به‌عنوان یک منبع آموزشی خوب برای درس مهندسی مخزن به‌کار رود.

مثال ۶: مهندسی مخزن، رفتار فازی سیال و پالایش گاز: زنجیره ارزش صنعت گاز

به‌طور معمول فرایندهای پالایش گاز در دسته صنایع پایین‌دستی قرار می‌گیرند. در حالی که فرایندهای برداشت از مخزن و بررسی خواص و مشخصات سیال تولیدی از مخزن، در دسته صنایع بالادستی قرار می‌گیرند. در این مثال، نمونه‌ای از کاربرد یک مسئله بالادستی مربوط به مهندسی مخزن گازی در تحلیل عملکرد یک مسئله پایین‌دستی مربوط به پالایش گاز ارائه می‌شود. در شکل ۳ نمودار فرایندی واحد تثبیت میعانات گازی در یک پالایشگاه گاز نشان داده شده است (Hajizadeh et al., 2018). نحوه نگرش به این واحد فرایندی، مانند همهٔ فرایندهای پالایشگاه گاز، به‌طور معمول مستقل از مخازن زیرزمینی تأمین‌کننده خوراک مجتمع است، به‌نحوی که تغییرات فرایندی، بهینه‌سازی واحد، مدیریت انرژی، تنظیم متغیرهای عملیاتی و ... به‌عنوان یک مسئله داخلی پالایشگاه و مستقل از خوراک ورودی قلمداد می‌شود. این در حالی است که کیفیت خوراک ورودی به مجتمع، در ۳۰ سال گذشته تغییر قابل‌توجهی کرده است. این تغییرات می‌توانند روی تنظیمات، نقطه بهینه عملکرد، مصرف انرژی، میزان انتشار گازهای اسیدی و گلخانه‌ای و مقدار محصولات واحد تثبیت میعانات گازی تأثیر بگذارند. دانشجویان درس مهندسی مخزن ضمن آشنایی با این الگوی یکپارچه در درک فرایندهای بالادستی و پایین‌دستی و تأثیر متغیرهای مخزنی بر عملکرد و خروجی پالایشگاه به ایده‌های جدیدی از الگوی مدیریت یکپارچه ذخایر طبیعی دست پیدا می‌کنند.

1- Condensate drop-out



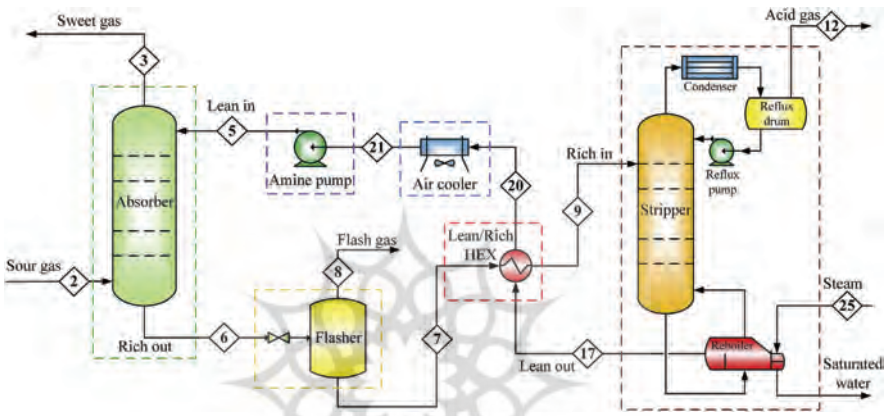
شکل ۳. واحد تثبیت پالایشگاه به همراه نمودار رفتار فازی مخزن (Hajizadeh et al., 2018)

مثال ۷: ترکیبات ترش سیال مخزن در پالایشگاه گازی

یکی از مواردی که به درک و بینش عمیق‌تر دانشجویان درس مخزن از مفهوم و کاربرد سیال مخزن گازی کمک می‌کند، آشنایی با سرنوشت ترکیبات معروف به گازهای اسیدی[1] شامل هیدروژن سولفوره و کربن‌دی‌اکسید است. در ادبیات مهندسی مخزن، این دو ترکیب همره با گاز نیتروژن به‌عنوان اجزای غیرهیدروکربنی مخزن گازی شناخته می‌شوند و دانشجویان با تأثیر این ترکیبات بر خواص سیال آشنا می‌شوند. به‌طور خاص، نقش این ترکیبات در کاهش حداقل فشار امتزاج بین گاز تزریقی و سیال به مخزن در زمان فرایند تزریق گاز امتزاجی و تأثیر این ترکیبات در بازیابی میعانات گازی زمان ذخیره‌سازی گازترش در مخزن تخلیه‌شده گاز میعانی بررسی شده است (Azin et al., 2014). ازسوی دیگر، چنان‌چه دانشجویان مهندسی مخزن با مشکلات حضور این دو ترکیب در گاز طبیعی، به‌ویژه ایجاد خوردگی‌های

1- Acid gases

شدید، روش‌های جداسازی گاز اسیدی مانند تصفیه با آمین و مصرف انرژی در واحدهای پالایشگاهی آشنا شوند، درک کامل‌تری از زنجیره ارزش فناوری و صنعت گاز پیدا می‌کنند. در شکل ۴ نمونه‌ای از مطالعات پایین‌دستی تصفیه با آمین برای حذف گازهای اسیدی از جریان گاز طبیعی نشان داده شده است (Mohamadi-Baghmolaei et al., 2021). در این رویکرد، دانشجو با واکنش‌های اساسی ترکیبات شیمیایی آمین با گاز اسیدی در واحدهای جذب و دفع آشنا می‌شود و تفاوت‌های میان خوراک ورودی به پالایشگاه از مخزن گازترش و گاز شیرین را درک می‌کند.



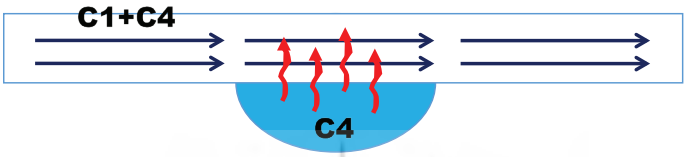
شکل ۴. تصفیه و جداسازی گازهای اسیدی در واحد آمین (Mohamadi-Baghmolaei et al., 2021)

مثال ۸: پدیده‌های انتقال در مخزن گازی

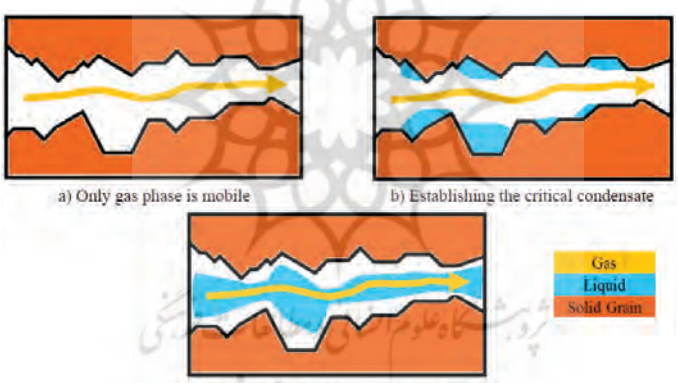
یکی از مواردی که کمتر در مهندسی مخزن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد، پدیده‌های انتقال[1] است. به‌طور سنتی، مبحث پدیده‌های انتقال در چارچوب مهندسی شیمی نگریسته شده و مربوط به فرایندهای پایین‌دستی و تجهیزات فرایندی انگاشته شده است. دانشجویان درس مهندسی مخزن تا زمان ورود به این مبحث با موازنه مواد و انرژی، ترمودینامیک و مکانیک سیالات (به‌عنوان یکی از سه ضلع پدیده‌های انتقال) آشنایی دارند. لیکن موضوعاتی همچون انتقال جرم، انتقال حرارت (به‌عنوان دو ضلع بعدی پدیده‌های انتقال) و همچنین مفهوم و کاربرد دو یا سه پدیده انتقال، انتقال سیال، انتقال جرم و انتقال حرارت نیازمند درک عمیق‌تری از دانش میان‌رشته‌ای و شناخت بهتر مسئله‌های جاری در مخزن است. بالطبع آشنایی دانشجویان با این مفاهیم و کاربردهای آنها، دروازه‌های نوین علم و فناوری را بر آنها می‌گشاید و به آنها کمک می‌کند تا روی مسئله‌های جدید فناورانه و مرز دانش کار کنند. در این راستا، مسئله تبخیر مجدد[2] میعانات گازی جداشده از جریان گاز تولیدی مخزن در زمان بازگردانی گاز[3]، یکی از مسئله‌های بسیار جذاب و در عین حال پیچیده است که به‌طور مستقیم کاربرد

1- Transport phenomena 2- Revaporization 3- Gas recycling

پدیده انتقال جرم در مهندسی مخزن گازی را تشریح می‌سازد. شکل ۵ مفهوم تبخیر مجدد میعانات گازی را در زمان تزریق و جریان گاز به مخزن نشان می‌دهد. همچنین، شکل ۶ حالت‌های مختلف جریان تک‌فازی و دوفازی گاز و میعانات را در مخزن گازی نشان می‌دهد. در همین راستا، معرفی اعداد بدون بعد[1] و ارائه اعداد بدون بعد جدید در مخزن گازی، بررسی پدیده‌های نفوذ مولکولی[2]، انتقال جرم توده[3] (Mohamadi-Baghmolaei et al., 2019, 2020, 2021) به‌عنوان یک کاربرد جدید از پدیده انتقال جرم در مخزن، به دانشجویان کمک می‌کند تا پل میان حوزه‌های مهندسی شیمی و مهندسی مخزن را بهتر درک کنند و درک چندبعدی از مسئله‌های پیچیده مهندسی مخزن پیدا کنند.



شکل ۵. مفهوم تبخیر مجدد میعانات گازی در زمان تزریق و جریان گاز به مخزن



شکل ۶. حالت‌های مختلف جریان تک‌فازی و دوفازی گاز و میعانات در مخزن گازی (Mohamadi-Baghmolaei et al., 2019)

۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله، سرفصل‌هایی از مبحث مهندسی مخزن از زیرمجموعه رشته مهندسی نفت در مقطع کارشناسی، با الگوی آموزش همگام با پژوهش‌های کاربردی و مبتنی بر زنجیره ارزش مهندسی گاز مورد بررسی قرار گرفت. الگوی جدید با هدف آشنایی دانشجو با مسئله‌های نوین، چندبعدی و میان‌رشته‌ای حوزه مهندسی مخزن و آشنایی با رویکرد پژوهش حین آموزش پیشنهاد شده است. مثال‌های

1- Dimensionless numbers 2- Molecular diffusion 3- Bulk mass transfer

مطرح‌شده در این مقاله شامل تغییرات رفتار فازی سیال با زمان، درک اقتصادی از مطالعات مخزن، جریان سیال در محیط متخلخل، معادله نفوذپذیری، ضریب پوسته، ضریب بهره‌دهی، رابطه بهره‌وری جریان، مهندسی مخزن، رفتار فازی سیال و پالایش گاز، ترکیبات ترش سیال مخزن در پالایشگاه گازی، پدیده‌های انتقال در مخزن گازی است. برخی سؤالات مرتبط با این رویکرد، در مهندسی مخزن مطرح و پاسخ‌های آن به تفصیل تحلیل شده است. درک موضوعات میان‌رشته‌ای مربوط به زنجیره ارزش گاز، به دانش مهندسی شیمی و مهندسی نفت نیاز دارد. به‌نظر می‌رسد دانشجویان با فراگیری درس مطابق الگوی آموزش همگام با پژوهش و شناخت کامل‌تر از زنجیره ارزش، آمادگی لازم برای ورود به مسئله‌های جدید را پیدا کنند.

تشکر و قدردانی

از همکاران متخصص صنعتی به‌ویژه آقایان دکتر حمید خدری (منطقه ۱۰ انتقال گاز)، مهندس مهدی داودی (مجتمع گاز پارس جنوبی)، مهندس منوچهر ولی‌زاده (شرکت بهره‌برداری نفت و گاز زاگرس جنوبی) بابت ارائه نظرات تخصصی در تکمیل زنجیره ارزش و فناوری‌های بالادستی و پایین‌دستی صنعت گاز سپاس‌گزاری می‌شود.

References

- Azin, R., Mohammadi Baghmolaei, M., and Sakhaei, Z. (2016), Parametric analysis of diffusivity equation in oil reservoirs, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 7, 169-179.
- Azin, R., Sedaghati, H., Fatehi, R., Osfouri, Sh., and Sakhaei, Z. (2018), Production assessment of low production rate of well in a super-giant gas condensate reservoir: Application of an integrated strategy, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 9, 543–560.
- Azin, R., Malakooti, R., Helalizadeh A., and Zirrahi, M. (2014), Investigation of underground sour gas storage in a depleted gas reservoir, Oil & Gas Sci. Tech., 69, 1227-1236.
- Brockman, Max. (2009), What's Next? Dispatches on the future of science, Translated by Reza Azin (2012), *Persian Gulf University Press*, ISBN 978-0-307-38931-2.
- Brown, G. O., 2002, Henry Darcy and the making of a law, *Water Resources Research*, 38, 1106
- Cosentino (2001), Integrated Reservoir Studies, ISBN 9782710807971.
- Craft, B. C., Hawking, M., and Terry, R. E. (1991), Applied petroleum reservoir engineering, 2nd ed., Prentice-Hall, Translated by Azin, R. et al. (2007).
- Farmani, Z., Azin, R., Fatehi, R., and Escrochi, M. (2018), Analysis of pre-darcy flow for different liquids and gases, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 17-31.
- Farmani, Z., Farokhian, D., Izadpanahi, A., Seifi, F., Zahedizadeh, P., Safari, Z., Ghaderi, A., Kazemi, F., and Azin, R. (2019), Pre-darcy flow and klinkenberg effect in dense, consolidated carbonate formations, *Geotechnical and Geological Engineering*, 37, 3255–3270.
- Hajizadeh, A., Mohamadi-Baghmolaei, M., Azin, R., Osfouri, Sh., and Heydari, I. (2018). Technical and economic evaluation of flare gas recovery in a giant gas refinery, *Chemical Engineering Research and Design*, 131, 506-519.
- Lak, A. Azin, R., Osfouri, Sh., Gerami, Sh., and Chahshoori, R. (2014), Choke modeling and flow

splitting in a gas-condensate offshore platform, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 21, 1163-1170.

- Mohamadi-Baghmolaei, M., Azin, R., Sakhei, Z., Mohamadi-Baghmolaei, R. and Osfouri, Sh. (2016a), Novel method for estimation of gas/oil relative permeabilities, *Journal of Molecular Liquids*, 223, 1185-1191.
- Mohamadi-Baghmolaei, M., Azin, R., Zarei, Z., and Osfouri, Sh. (2016b), Presenting decision tree for best mixing rules and z-factor correlations and introducing novel correlation for binary mixtures, *Petroleum*, 2, 289-295.
- Mohamadi-Baghmolaei, M., Hajizadeh, A., Zahedizadeh, P., Azin, R., and Zendehboudi, S. (2021), Evaluation of hybridized performance of amine scrubbing plant based on exergy, energy, environmental, and economic prospects: A Gas Sweetening Plant Case Study, *Energy*, 214, 118715.
- Mohamadi-Baghmolaei, M., Azin, R., Osfouri, Sh., and Zendehboudi, S. (2019), Experimental and modeling investigation of non-equilibrium condensate vaporization in porous systems: Effective Determination of Mass Transfer Coefficient, *Fuel*, 262, 116011.
- Mohamadi-Baghmolaei, M., Azin, R., Osfouri, Sh., and Zendehboudi, S. (2019), Evaluation of mass transfer coefficient for gas condensates in porous systems: Experimental and Modeling, *Fuel*, 255, 115507.
- Mohamadi-Baghmolaei, M., Azin, R., Osfouri, Sh., Zendehboudi, S., Hajizadeh, A., and Izadpanahi, A. (2021), Mass transfer during transient condensate vaporization: Experimental and modeling study, *Journal of Molecular Liquids, In Press*, https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114022.
- Nabipour, I. (2018), The third generation University in the fourth industrial revolution, Bushehr University of Medical Science Press, ISBN 978-600-5032-87-1.
- Nabipour, I. (2019), Science and Technology Convergence, An approach to the 3rd generation University, Bushehr University of Medical Science Press, ISBN 978-600-5032-96-3.
- Saidi, A. M. (2013), Realism of Flow Mechanism in Reservoirs, Tehran: Ava kherad publishing, ISBN 978-600-90673-7-4.
- Osfouri, Sh., Azin, R., and Gerami, Sh. (2017), Phase behavior of gas condensate fluids, Persian Gulf University Press, ISBN 978-600-7544-18-1.

رضا آذین: استاد مهندسی نفت دانشگاه خلیج فارس، دانش آموخته مهندسی شیمی در مقاطع کارشناسی و ارشد و مهندسی نفت در مقطع دکتری است. زمینه کاری ایشان مهندسی مخازن نفت و گاز، مدیریت کربن، تحلیل انرژی و اگزرژی فرایندهای شیمیایی، نوآوری، توسعه فناوری، آموزش مهندسی، منتورینگ کسب و کارهای نوپا (استارتاپ) در صنایع بالادستی نفت و گاز، صنایع فرایندی و شیمیایی فرایند است.