

بررسی تجربی اثر اندازه قطر، ارتفاع سقوط و نوسان های عمودی - افقی

قطره بر روی پدیده پیوند قطره با فصل مشترک فاز همگون^۱

محمدعلی موسویان

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

حسین بهمنیار

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

پریسا خدیوپاریسی

دانشجوی دکترای گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۷۹/۶/۶، تاریخ تصویب ۷۹/۱۱/۱۵)

چکیده

جهت بررسی تجربی عوامل موثر بر روی پدیده پیوند قطره با فصل مشترک فاز همگون و دستیابی به نحوه تغییرات زمان پیوند، در ابتدا دستگاه پیوند قطره^۲ طراحی، و ساخته شد و سپس آزمایش های متعددی بر روی سامانه های (سیستم های) شیمیایی دو جزئی در حالت عدم حضور مواد فعال سطحی^۳ صورت گرفت. در این پژوهش، از سه سامانه شیمیایی استفاده گردیده است: تولوئن (فاز پیوسته) - آب (قطره)، نرمال هپتان (فاز پیوسته) - آب (قطره) و تولوئن (فاز پیوسته) - محلول ۶۰٪ حجمی گلیسرین در آب (قطره). آب مورد استفاده در کلیه آزمایش ها از نوع یک بار تقطیر شده، بوده و فازهای پیوسته و قطره قبل از انجام هر آزمایش، از یکدیگر اشباع گردیده اند. متغیرهای اساسی بررسی شده در این پژوهش عبارتند از: اندازه قطر قطره، ارتفاع سقوط و نوسان های عمودی و افقی قطره بر روی فصل مشترک. نتایج آزمایش بیان کننده آن است که؛ اولاً، با افزایش قطر قطره و ارتفاع سقوط آن، بر مقدار زمان صرف شده برای فرآیند پیوند افزوده می شود، ثانیاً، در سامانه تولوئن - آب، پدیده پیوند تک قطره با فصل مشترک، در چند مرحله پیاپی و حداکثر در پنج مرحله به وقوع می پیوندد و به ندرت یک مرحله ای می باشد. در سامانه نرمال هپتان - آب، به دلیل بالا بودن مقدار کشش بین سطحی، پدیده پیوند چند مرحله ای بسیار نادر است. در سامانه تولوئن - محلول آبی ۶۰٪ حجمی گلیسرین، به دلیل بالا بودن مقدار نسبت گرانیوزی فاز قطره به فاز پیوسته و مقدار کشش بین سطحی بالا، پیوند چند مرحله ای به هیچ وجه مشاهده نگردید. افزایش قطر قطره و نیز ارتفاع سقوط قطره در سامانه ای که دارای پیوند چند مرحله ای می باشد، سبب کاهش مراحل پی پی پی پی پی پی پی پی و سوق دادن آن به سوی پیوند یک مرحله ای می گردید. همچنین مشاهده گردید که وجود نوسانات عمودی و افقی قطره بر روی فصل مشترک دو فاز، سبب پایداری قطره و افزایش زمان پیوند گردیده است.

واژه های کلیدی: قطره، فاز پراکنده، فاز پیوسته، فصل مشترک، زمان پیوند، زمان تخلیه، استخراج مایع - مایع

مقدمه

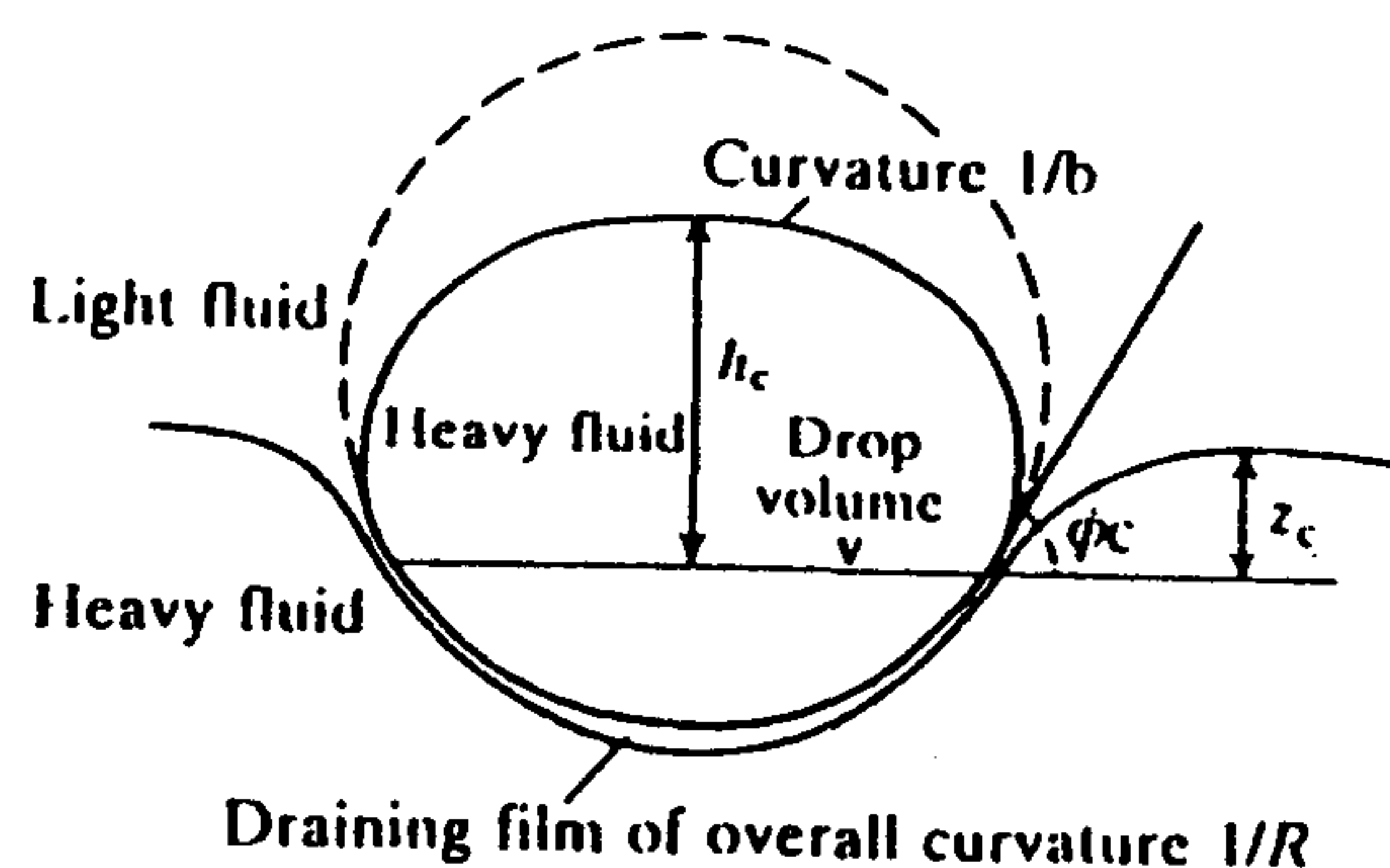
اثر تجمع فاز پراکنده^۵، بستری از قطرات در مرز مشترک با فاز پیوسته^۶ تشکیل می شود. به منظور جداسازی قطرات از فاز پیوسته و هدایت هر یک از دو فاز به جریان های خروجی مجزا، پدیده پیوند قطره ها با فصل مشترک یا با قطرات مجاور^۷ صورت می گیرد. بدین ترتیب همانند شرایط ورودی، جریان های شفاف از دو مایع در خروج از دستگاه وجود خواهد داشت [۲، ۱]. پدیده

در فرآیند استخراج مایع - مایع^۴ و کلیه عملیاتی که از دو مایع غیر قابل امتزاج تشکیل یافته است، به منظور افزایش بازده انتقال جرم و بنا به ملاحظات طراحی - عملیاتی و اقتصادی، از طریق نصب توزیع کننده در انتهای مسیر ورودی یکی از فازها به دستگاه، فاز مربوطه به قطراتی با سطح تبادل افزون تر تبدیل می گردد و پس از انجام فرآیند شیمیایی، در بعضی از موارد در

پیوند در مجموعه قطرات و تعیین رابطه ریاضی قطره منفرد پرداختند و مدل‌های ریاضی آن را غنا بخشیدند. هم چنین، به بررسی نگره‌ای (تئوریک) و تجربی مدل‌های پیوند قطره‌های دوگانه و تجزیه و تحلیل چگونگی تکوین مرحله پیوند قطرات بسیار کوچکی با اندازه میکرون پرداخته‌اند و هم‌چنان تحقیقات در این زمینه ادامه دارد [۳ - ۵].

مراحل اصلی پدیده پیوند قطره

با توجه به شکل (۱)، قطره تشکیل شده، بسته به سبک‌تر یا سنگین‌تر بودن نسبت به فاز پیوسته، در فضای این فاز حرکت بالا رونده یا پایین رونده خواهد داشت و خود را به نوار مرزی در فصل مشترک فاز پیوسته و فاز همگون خود که حاصل پیوند و ادغام قطرات قبلی است می‌رساند. لایه نازک تشکیل شده از فاز پیوسته، به عنوان لایه حایل^۹ و ممانعت کننده، از وقوع پیوند آبی و سریع جلوگیری می‌کند.



شکل ۱: وضعیت عمومی قطره بر روی فصل مشترک [۴].

از این لحظه، مدت زمان پدیده پیوند قطره - فصل مشترک، به چهار مرحله کلی تقسیم می‌شود [۴ - ۶]:
 - زمان نوسان و پیش تخلیه^۹: قطره به لایه حایل می‌رسد و به داخل فصل مشترک فرو می‌رود و در نتیجه از حداکثر سطح تماس برخوردار می‌شود. سپس تحت حرکت ارتجاعی به عقب باز می‌گردد و با توجه به سرعت و مومنتوم حاصل از سقوط یا صعود، مدتی دارای نوسان‌های عمودی خواهد بود. آنگاه کاملاً در روی فصل مشترک جایگزین گشته و سطح کمتری را اشغال می‌کند.

- زمان تخلیه^{۱۰}: لایه حایل در بین قطره و فصل مشترک، تحت اثر نیروی وزن قطره به تدریج به درون فاز پیوسته اطراف و در برگیرنده قطره، تخلیه و در نتیجه به مرور زمان نازک می‌شود.

پیوند قطرات تأثیر عمیقی بر طراحی و عملکرد دستگاه‌های استخراج مایع دارد. از منظر ترمودینامیکی، با انجام این پدیده میزان انرژی سطحی قطرات به حداقل می‌رسد و پایداری حاصل می‌گردد.

در شرایطی که احتمال تجمع و انباشتگی قطرات در کل دستگاه شدید می‌باشد و سبب کاهش بازده فرآیند می‌گردد، لازم است که به پدیده پیوند قطره، سرعت بخشیده شود. در موارد دیگری به جهت نیل به حداکثر بازده در انتقال جرم و یا تهیه محلول‌های معلق پایدار در صنایع غذایی و دارویی، نیاز به کند نمودن این پدیده می‌باشد.

بنابراین دانستن عوامل فیزیکی - شیمیایی و عملیاتی موثر بر روی این پدیده و نحوه تأثیر هر یک در چگونگی نظارت بر امر مذکور بسیار با اهمیت خواهد بود [۳]. مثال‌های بارز و عملی پیوند قطره، علاوه بر فرآیند استخراج، در بازیابی حلال‌های گران قیمت، زدایش مواد نفتی در عملیات تصفیه آب‌های زاید، جداسازی فازها در خطوط انتقال نفت خام، مخازن مخلوط شونده و راکتورهای شیمیایی، فرآورش محصولات دارویی و لبنی و حتی در هنگام تشکیل قطرات باران در ابرها، می‌باشد. بدین ترتیب طراحی مرحله نهایی استخراج، مبحث مهمی از نظر پیشینه پژوهشی و شامل توجیه پدیده پیوند، معادله‌های ریاضی و تجربی مرتبط با آن است [۳، ۴]. در حالت کلی پدیده پیوند بین یک قطره با فصل مشترک مایع شفاف و همگون از همان فاز، و یا بین دو قطره مجاور صورت می‌پذیرد. معمولاً به دلیل پیچیدگی روند پیوند دو قطره و دشواری انجام آزمایش‌های مربوطه که مستلزم نگاهداری و تداوم تماس قطرات تا وقوع پیوند است، با ساده نمودن قضیه، نخست پیوند تک قطره با فصل مشترک مایع شفاف و همگون توجیه، تبیین و مدل‌سازی می‌شود و سپس به زوج قطرات و در نهایت به مجموعه قطرات مجاور پرداخته می‌شود، که در این مورد آخر از روابط ریاضی و تجربی زوج قطره، و قطره - فصل مشترک استفاده می‌شود. به هر روی، با فرض میل نمودن شعاع انحنای یکی از قطرات دوگانه، به مقدار بی نهایت، وضعیت قطره - فصل مشترک حاصل می‌گردد [۴].

پدیده پیوند قطرات در حالت عام و کلی، نخستین بار در بررسی برخورد قطرات باران با سطح آبگیرها مورد توجه قرار گرفت. در این زمینه مطالعات جدی و علمی از دهه دوم قرن بیستم میلادی آغاز و تاکنون ادامه دارد. پس از آن به بررسی

مشترک ، حرکات سطحی فصل مشترک ، حرکت دورانی ، نوسانی و نامنظم قطره (ناشی از سقوط یا صعود بر روی فصل مشترک) ، تغییر زاویه نشستن قطره و ایجاد لایه نامتقارن ، جریان چرخشی محتویات داخل قطره در قطرات بزرگ ، آثار دیواره‌ای دستگا، و خاصیت ترشوندگی یا عدم ترشوندگی دیواره دستگاه توسط فاز قطره .

این مسئله حتی در سامانه‌های شیمیایی کاملاً پاکیزه نیز وجود دارد که ناشی از گسیختگی موضعی لایه حایل است. بعضی از پژوهشگران ، زمان پیوند را در سامانه‌های شیمیایی عاری از آلودگی کاملاً تجدیدپذیر یافته‌اند [۵،۶]. در حالت کلی برای تعیین روابط ریاضی و تجربی مربوط به این پدیده، آزمایش‌های پدیده پیوند قطره، حداکثر برای ۱۰۰ تا ۱۵۰ قطره و به‌طور متوسط برای ۴۰ تا ۵۰ قطره، تکرار و ثبت می‌شود. بدیهی است که در صورت وجود مواد فعال سطحی این امر دشوارتر می‌گردد [۷].

پدیده پیوند چند مرحله‌ای (پاره‌ای) ۱۳ قطره

پدیده پیوند قطرات مواد نفتی در فاز پیوسته غیر آلی و برعکس، معمولاً در یک مرحله انجام نمی‌شود و پس از تخلیه لایه و گسیختگی در نقطه مشخصی از آن ، مقداری از مایع درون فاز قطره به داخل فاز مادر منتقل شده و ستون استوانه‌ای شکلی با ارتفاع معین، در دو سوی فصل مشترک ایجاد می‌شود که در صورت کوچک تر یا مساوی بودن محیط پیرامون استوانه با ارتفاع آن، قطره دومی با حجمی معادل با حجم ستون و کوچکتر از قطره اول، جایگزین آن می‌شود. امکان وقوع همین مسئله برای قطره دوم نیز وجود داشته و به ترتیب به مراحل سوم و الی آخر منجر می‌شود. این پدیده تحت عنوان پدیده پیوند چند مرحله‌ای یا پاره‌ای نام نهاده شده است [۴،۵]. تعداد مراحل پیوند محدود و حداکثر به ۱۰ مرحله می‌رسد. قطره حاصل از اولین مرحله پیوند (قطره دوم)، از نظر مدت زمان عمر پایدارتر از قطره اولیه و قطرات مراحل دیگر است و با افزایش قطر قطره اولیه، تعداد مراحل پیوند بیشتر خواهد شد. اگر مراحل پیوند پاره‌ای به حداکثر تعداد برسد قطره نهایی به دلیل اندازه بسیار کوچک، قادر به پیوند نبوده و وارد فاز پیوسته می‌شود و در نهایت سبب کاهش بازده انتقال جرم می‌گردد. این معضل در برج‌های صنعتی از طریق افزودن مواد فعال سطحی یا اعمال میدان الکتریکی - مغناطیسی و در دستگاه‌های آزمایشگاهی با استفاده

ممکن است به دلیل نحوه قرارگیری نامتقارن قطره در روی فصل مشترک، بعضی از قسمت‌های لایه حایل سریع‌تر نازک گردد.

- زمان گسیختگی ۱۱ : به سبب نازک شدن بعضی از نقاط لایه حایل در اثر تخلیه مایع تشکیل دهنده لایه (تا حد ۱ تا ۱۰ میکرومتر)، روزهایی در آن ایجاد و محتویات قطره از ورای این منافذ به داخل فاز مادر و همگون منتقل می‌شود.

- زمان اختلاط ۱۲ : در ادامه مرحله قبل انجام می‌شود و قطره کاملاً در فاز مادر محو می‌شود.

در پدیده پیوند دو قطره مجاور ، لایه حایل بین آنها تشکیل می‌شود و مراحل چهارگانه فوق در صورت وجود فاصله مناسب لازم برای پیوند اتفاق می‌افتد و عامل تخلیه لایه علاوه بر نیروی وزن ، شامل نیروهای مربوط به مومنتوم قطرات در حالت وجود همزنش و اختلاط می‌باشد. اگر ضخامت لایه پس از تخلیه به مقداری در حدود چند صد آنگستروم برسد، نیروهای بین مولکولی از نوع برد کوتاه (London - Van Der Waals) ، بروز نموده و بر نیروهای احتمالی دیگر از جمله نیروهای الکتریکی مربوط به یون های مواد رسانا در فصل مشترک که از خاصیت پایدار کنندگی سطح برخوردارند غلبه کرده، سبب گسیختگی سریع لایه می‌گردد. طبعاً برای پیوند دو قطره برخوردنده به یکدیگر ، لازم است که ضخامت لایه حایل بین آنها از شعاع لایه و نیز شعاع هر یک از قطرات کوچکتر باشد [۴]. تجربه نشان داده است که در میان مراحل چهارگانه پیوند قطره ، مرحله تخلیه لایه حایل، از کمترین سرعت برخوردار است و در محدوده زمانی چند ثانیه، به وقوع می‌پیوندد. بنابراین، مرحله مذکور به عنوان مرحله تعیین کننده کل فرآیند بوده می‌توان کل زمان پیوند را برابر با مقدار زمان مرحله مذکور دانست. بدیهی است که اگر زمان کل پیوند کمتر از یک دهم ثانیه باشد پیوند قطره از نوع آنی و خود به خود محسوب می‌شود [۲،۵].

به ازای یک سامانه (سیستم) شیمیایی خاص و تثبیت کلیه شرایط آزمایشگاهی و یکسان بودن اندازه قطره ، تکرار آزمایش‌های پیوند قطره منجر به به‌دست آوری مقدار زمان یکسانی نمی‌شود و همواره توزیعی از زمان‌ها با نقاط حداقل و حداکثر مرزی به‌دست می‌آید. تکرار ناپذیری در روند تعیین زمان پیوند، ناشی از چندین عامل است از جمله : وجود ناخالصی‌ها و آلودگی های ناشی از حضور مواد فعال سطحی ، وجود بارهای الکتریکی و یون‌های موجود در سامانه و فصل مشترک ، تغییرات کشش بین سطحی فازها در اثر تغییرات غلظت در روی فصل

$$-\frac{dh}{dt} = \frac{2\pi F}{3\mu_c a^2} h^3 \quad (1)$$

این معادله، برای قطراتی با اندازه کوچکتر از یک میلی‌متر، و دارای کشش بین سطحی بیش از ۳۰ میلی نیوتن بر متر، صادق است. معادله نهایی زمان پیوند عبارت است از:

$$t = \frac{\mu_c \Delta\rho g b^5}{4\sigma^2} \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) \quad (2)$$

h_1 و h_2 ، به ترتیب ضخامت اولیه و نهایی لایه حایل است و با فرض ($h_2 \ll h_1$)، رابطه به معادله روانکاری تبدیل می‌شود:

$$t = \frac{\mu_c}{4} \frac{b^5 \Delta\rho g}{\sigma^2 h_2^2} \quad (3)$$

- قطره نیم کره ^{۱۷}: برای قطراتی با قطری بزرگتر از یک سانتی‌متر صادق است و در هنگام جای گرفتن بر روی فصل مشترک تغییر شکل کامل می‌دهد و به حالت نیم کره کامل تبدیل می‌شود. رابطه ریاضی بر خلاف معادله قبلی، مستقل از جرم‌های مخصوص دو فاز است و ضخامت لایه هم‌چنان یکنواخت بوده و فصل مشترک به صورت مسطح باقی می‌ماند:

$$t = \frac{3\mu_c b^3}{\sigma} \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) \quad (4)$$

- قطره صلب (یا تغییر شکل دهنده) ^{۱۸}: در این حالت قطره در لایه حایل فرو رفته و بسته به اندازه قطره، شعاع انحنای فصل مشترک و لایه حایل، ضرایب متفاوتی از شعاع قطره خواهد بود ($R = \lambda b$). در حالت‌های $\lambda \leq 1$ و $\lambda \geq 1$ ، قطره صلب روی لایه حایلی با ضخامت یکنواخت، قرار خواهد گرفت. در صورت $\lambda = 2$ ، بخشی از قطره که در مجاورت فصل مشترک است، از وضعیت کروی خارج می‌شود و در حالت بزرگ بودن اندازه قطره در بخش مذکور فرو رفتگی داخلی قطره، ایجاد می‌شود.

- قطره و فصل مشترک صلب (حالت کره و صفحه) ^{۱۹}: قطره و فصل مشترک، هر یک با حفظ شکل اولیه خود در مجاورت هم قرار می‌گیرند. این حالت برای قطرات بسیار کوچک صادق است:

$$t = \frac{6\pi\mu_c b^2}{F} \log(h_1/h_2) \quad (5)$$

در مقایسه بین روابط ریاضی، معادله‌هایی به واقعیت و

از وسایل مکنده قطرات غباری شکل مذکور برطرف می‌گردد. به عنوان یک قاعده کلی، در صورت قرار گرفتن مقدار عددی نسبت گرانروی‌های فاز قطره و فاز پیوسته، در محدوده اعداد ۰/۰۲ تا ۱۱، این پدیده انجام می‌گیرد. در مورد دو قطره مجاور یکدیگر، در صورتی که نسبت اندازه‌های دو قطره بیش از عدد ۳/۵ باشد، پدیده فوق اتفاق می‌افتد [۷،۱].

معادلات ریاضی حاکم بر پدیده پیوند قطره و فصل مشترک

شکل نهایی قطره در روی فصل مشترک، به قطر قطره، کشش بین سطحی و اختلاف جرم‌های مخصوص دو فاز، سرعت و ارتفاع سقوط یا صعود قطره و وجود یا عدم وجود جریان‌های چرخشی درونی آن بستگی دارد. اگر اندازه قطره بزرگتر از یک میلی‌متر باشد، در هنگام نشستن در روی فصل مشترک، مقداری از شکل کروی آن کاسته می‌شود [۸،۷]. لایه حایل بین قطره و فاز مادر همگون، بر دو نوع لایه‌های دارای ضخامت یکنواخت ^{۱۴} و غیر یکنواخت ^{۱۵} تقسیم می‌شود. در عمل معادله‌های دارای لایه‌هایی با ضخامت یکنواخت، فقط برای قطرات بسیار کوچک، با اندازه کمتر از یک میلی‌متر که فاقد حرکات دورانی داخلی و خارجی بوده و وضعیت صلبی داشته باشند، صادق است. هم‌چنین، همواره پس از نازک شدن لایه غیر یکنواخت، ضخامت آن یکنواخت می‌شود. معادله‌های ریاضی حاکم بر زمان پیوند قطره، براساس به دست آوری زمان تخلیه لایه حایل بین قطره و فصل مشترک، و موازنه کار مکانیکی ناشی از جریان تخلیه به درون فاز پیوسته، در مقابله با مقاومت تنش برشی این فاز حاصل می‌گردد.

بدین ترتیب با توجه به شکل‌های گوناگون قطره و فصل مشترک نسبت به یکدیگر، معادلات گوناگونی حاصل شده است [۱۲-۱]:

- قطره تغییر شکل دهنده بر روی فصل مشترک صلب (حالت صفحه‌های موازی) ^{۱۶}: در این وضعیت، لایه حایل، مسطح و یکنواخت است و قسمتی از قطره که در مجاورت فصل مشترک می‌باشد، با تغییر انحنا تبدیل به صفحه‌ای موازی با فصل مشترک می‌گردد. معادله ریاضی براساس مدل تخلیه مایع از بین دو صفحه جامد موازی که تحت نیروی F به یکدیگر نزدیک می‌شود به دست آورده شده و به معادله روانکاری استفان - رینولدز (Stefan - Reynolds) معروف است:

تغییر شکل دهنده با فرو رفتگی در طرفین لایه حایل، دو قطره تغییر شکل دهنده با سطوح مسطح لایه حایل در دو طرف آن، دو قطره بیضی شکل که از انتهای کشیده شده خود به یکدیگر نزدیک شده‌اند، و یک قطره صلب مجاور با قطره بزرگتری که دچار فرورفتگی داخلی شده است.

در مورد قطرات کوچک، اگر ضخامت لایه حایل بین دو قطره، در مقایسه با شعاع قطره ناچیز باشد، معادله زمان پیوند عبارت است از:

$$t = \frac{3\pi r \mu_c}{F} b^2 \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (11)$$

عوامل موثر بر پدیده پیوند قطره

در حالت کلی، عوامل مختلف موثر بر این پدیده عبارتند از [۱۴-۱]:

- اندازه قطر قطره: پژوهشگران رابطه زمان پیوند تک قطره با قطر آن را، به صورت معادله توانی $t \propto d^m$ با محدوده عملی $(0.6 < m < 3.15)$ به دست آورده‌اند. بعضی از محققین مقدار توان رابطه مذکور را در بعضی از سامانه‌های (سیستم‌های) حاوی مواد فعال سطحی، نزدیک به عدد صفر و حتی، اعداد منفی گزارش نموده‌اند. تجربیات، حاکی از روند افزایشی زمان پیوند قطره بر حسب افزایش قطر آن در سامانه‌های فاقد مواد فعال سطحی می‌باشد.

- ارتفاع سقوط یا صعود قطره: مانند اندازه قطر قطره، رابطه پیشنهادی از نوع رابطه توانی $t \propto L^m$ است و با افزایش ارتفاع سقوط یا صعود قطره و در نتیجه افزایش اغتشاشات ایجاد شده در روی فصل مشترک، بر مدت زمان پیوند، افزوده می‌شود. توان m ، مستقل از دما است و با افزایش قطر قطره، بیشتر می‌شود. بنا به نظر عده‌ای، اگر قطره مسافت پانزده تا بیست برابر اندازه خود را طی نماید، زمان پیوند مستقل از ارتفاع، می‌گردد.

- اختلاف جرم‌های مخصوص دو فاز: در پیوند تک قطره با فصل مشترک، افزایش این متغیر سبب افزایش زمان پیوند می‌گردد، و در مجموعه به هم فشرده‌ای از قطرات، اثر معکوس دارد.

- گرانیروی (ویسکوزیته) فازها: گرانیروی فازهای پیوسته و قطره به ترتیب، اثر مستقیم و معکوس بر زمان پیوند خواهد داشت.

- کشش بین سطحی فازها: کلیه شواهد، دال بر کاهش زمان پیوند بر اثر افزایش کشش بین سطحی است.

- درجه حرارت: تأثیر دما بر روی خواص فیزیکی به گونه‌ای

تجربه نزدیک‌ترند، که مقدار توان قطر قطره را در روابط زمان پیوند، کمتر از عدد پنج، پیش‌بینی نمایند.

از حل عددی معادله ریاضی برای لایه حایلی با ضخامت غیریکنواخت، در مختصات کروی، و با در نظر گرفتن حجمی از قطره که در درون فصل مشترک غوطه‌ور است و سپس فرض یکنواختی ضخامت لایه حایل، چنین نتیجه می‌گردد [۹]:

$$t = \frac{3}{16\pi} n^2 \mu_c \left(\frac{a^2}{F} \right) \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_1^2} \right) \quad (6)$$

این معادله برای لایه مسطح یا کروی نازک، صادق است. در این معادله n ، برابر با تعداد سطوح ساکن لایه است و مقداری بین اعداد صفر و دو دارد که در صورت اضافه کردن مواد فعال سطحی، به سمت عدد دو میل می‌کند و برابر با معادله روانکاری (معادله ۳) می‌گردد. این معادله برای پیوند دو قطره، تحت نیروی وزن و نیز برای گلوله صلب برخوردارنده به فصل مشترک مایع هم، صادق است.

معادلات تجربی حاکم بر پدیده پیوند قطره [۵،۲]

- برای قطرات فاز آلی در محیط پیوسته فاز آبی و در حضور مواد فعال سطحی:

$$\ln(N/N_0) = -c(t - t_0)^m \quad (1.5 \leq m \leq 2.5) \quad (7)$$

- در مجموعه قطرات:

$$\frac{\sigma t}{\mu_c d} = 31 \times 10^3 \left(\frac{d^2 \Delta \rho g}{\sigma} \right)^{-1.24} (\mu_d / \mu_c)^{1.03} \quad (8)$$

- برای قطره بر روی فصل مشترک و نیز برای دو قطره مجاور:

$$\frac{\sigma t}{\mu_c d} = 1.32 \times 10^5 \left(\frac{L}{d} \right)^{0.18} \left(\frac{d^2 \Delta \rho g}{\sigma} \right)^{0.32} \quad (9)$$

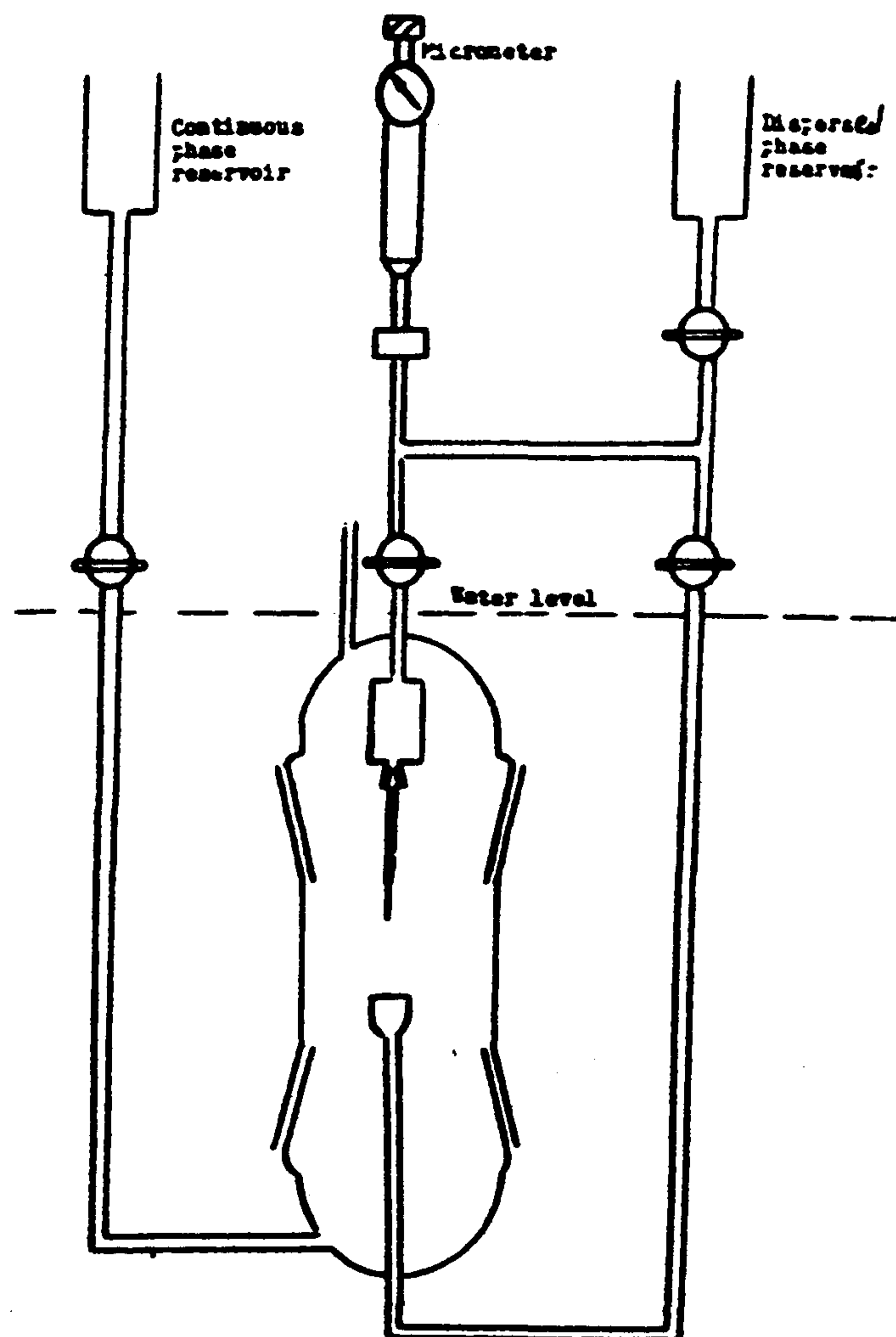
در مورد قطرات بزرگ:

$$t \propto \frac{n^2 \mu_c v^{0.81}}{(\Delta \rho g)^{0.28} \sigma^{0.72}} \quad (10)$$

که در معادله (۱۰)، تابعیت زمان پیوند با شعاع قطره، بصورت $(t \propto b^{2.43})$ است و به واقعیت نزدیک‌تر است.

گونه‌های مختلف قرار گرفتن دو قطره مجاور [۱۳-۹،۵،۲]، عبارت است از: دو قطره صلب کروی (قطرات کوچک)، دو قطره

برابر با مقدار عددی ۱۰ در نظر گرفته می‌شود. بنا به شکل (۲)، قسمت های مختلف دستگاه نهائی به شرحی است که در پی می‌آید:



شکل ۲: دستگاه پیوند قطره - فصل مشترک.

۱- بدنه اصلی دستگاه، که با توجه به ملاحظات آزمایشگاهی و انتخاب فاز سنگین به عنوان فاز قطره، در قسمت پایین آن فنجان گیرنده شیشه‌ای قرار گرفته است و به مخزن تغذیه فاز پراکنده متصل شده است. لبه فنجان مذکور محل تشکیل فصل مشترک فازها است و توسط دستگاه تراش به طور کامل صیقل داده شده است. در قسمت بالای بدنه، دستگاه تولید قطره (میکروپورت) به منظور ایجاد فاز قطره‌سان، نصب شده است و تغذیه آن، مستقل صورت گرفته و همواره ارتفاع مایع در آن ثابت نگاه داشته می‌شود. به انتهای میکروپورت و در داخل دستگاه، لوله‌های مویینه (کاپیلاری)، با قطرهای داخلی متفاوت، نصب می‌گردد.

۲- مخازن نگهداری و تغذیه فاز پیوسته (فاز سبک)، و فاز

است که در نهایت، افزایش آن، سبب کاهش زمان پیوند می‌شود. - وضعیت انحنای فصل مشترک: فصل مشترک مقعر به دلیل سطح تماس بیشتر با قطره، زمان بیشتری را برای پیوند صرف می‌کند.

- آثار میدان الکتریکی: فقط در صورت رسانا بودن فاز قطره و نارسانایی فاز پیوسته، سبب کاهش زمان پیوند می‌گردد و در بقیه موارد بی‌اثر است.

- حضور مواد رسانا (الکترولیت): باعث جمع شدن بارهای الکتریکی هم نام، در مجاورت سطوح داخل و خارج لایه حایل می‌شود و با ایجاد اثر الکترو ویسکوز، زمان پیوند را افزایش می‌دهد.

- حضور ماده خارجی: به سه صورت مواد فعال سطحی، مواد شرکت کننده در انتقال جرم و ذرات ریز جامد، نمود می‌یابد. در حالت کلی مواد فعال سطحی آلی باعث افزایش زمان پیوند می‌گردند. اثر پدیده انتقال جرم فقط در جهت انتقال از فاز قطره به فاز پیوسته بوده و سبب کاهش زمان پیوند می‌شود. ذرات جامد نیز با توجه به خاصیت ترشوندگی یا ترنشوندگی توسط فازها به ترتیب، باعث کاهش و افزایش زمان پیوند می‌گردند. همچنین مواد فعال سطحی باعث کاهش تعداد مراحل در پیوند چند مرحله‌ای می‌شود.

- ارتعاشات: گزارش‌های موجود در این زمینه متفاوت و تا حدی متناقض است. بعضی از محققین، ارتعاشات داخلی و نیز ارتعاشات خارجی وارده بر بدنه دستگاه را سبب پایداری قطره و برخی سبب کاهش پایداری آن می‌دانند.

شرح دستگاه ساخته شده و آزمایش‌ها

به منظور آزمایش و بررسی عوامل مختلف فیزیکی - شیمیایی و عملیاتی موثر بر روی پدیده پیوند قطره - فصل مشترک، نخست، دستگاه پیوند قطره [۵،۴]، طراحی گردید و توسط کارگاه شیشه سازی دانشکده فنی دانشگاه تهران ساخته شد. پس از آزمایش‌های مقدماتی فراوان بر روی سامانه‌های شیمیایی مختلف، به منظور رفع نقائص عملیاتی، تصحیحات لازم و مجدد در ساخت و طراحی اولیه صورت گرفت. با توجه به خاصیت خوردگی مواد شیمیایی متداول در آزمایش؛ کل دستگاه، اتصالات و شیرها از جنس شیشه مقاوم پیرکس انتخاب گردیده است. به منظور جلوگیری از اثرات دیواره‌ای، بر روی پدیده پیوند، حداقل نسبت مقدار ارتفاع به قطر داخلی دستگاه،

فصل مشترک دو فاز را تشکیل می‌دهد. پس از آن، با بازکردن شیر تخلیه در پایین دستگاه، فصل مشترک بین دو فاز، تا لبه فنجان پایین آورده می‌شود و نوک لوله مویینه که قبلاً توسط فاز پراکنده مادر آغشته شده است، در محیط فاز پیوسته قرار می‌گیرد. در مرحله آخر، مخزن میکروپورت در بالای دستگاه توسط فاز پراکنده به‌طور مستقل پر می‌گردد و هواگیری احتمالی نیز صورت می‌پذیرد. در تمام مراحل آزمایش سعی گردیده است که ارتفاع مایع در میکروپورت ثابت نگاه‌داشته شود تا خللی در سرعت تشکیل قطره ایجاد نگردد. پس از انجام هر آزمایش در هر سامانه شیمیایی خاص، با باز کردن شیر مخزن تغذیه فنجان، آلودگی‌های احتمالی موجود در روی فصل مشترک به پایین دستگاه منتقل و تخلیه می‌شود. به منظور تولید قطراتی با اندازه‌های مختلف در سامانه‌های شیمیایی مورد آزمایش، از لوله‌های مویینه شیشه‌ای با قطرهای داخلی در محدوده اعداد ۰/۴ تا ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است. هر یک از شاخه‌های لوله‌های مویینه، در ۶ ارتفاع مختلف برش داده شده است تا آزمایش‌های مربوط به اثر ارتفاع سقوط قطره، بر فرآیند پیوند قطره، انجام گردد. انتهای هر جفت از لوله‌های مویینه هم‌اندازه و هم‌طول، برای دو حالت مسطح و نوک تیز، کاملاً پرداخت و صیقل داده شده است و توسط فاز پراکنده، قبل از انجام هر آزمایش آغشته گردیده تا قطره خروجی، در دیواره خارجی آن، به شکل و اندازه نهایی برسد.

ابتدای کلیه لوله‌های مویینه، به اتصال شیشه‌ای از نوع سر سنباده‌ای جوش داده شده و توسط فنر فولادی ضدزنگ به انتهای میکروپورت در دستگاه، متصل می‌گردد. قطره در هنگام خروج بلافاصله در محیط فاز پیوسته قرار می‌گیرد و سپس فضای محیط را طی کرده خود را به فصل مشترک دو فاز در روی لبه فنجان، می‌رساند.

بنابه تجربه شخصی و نیز نقل قول پژوهشگران، قطر قطره خروجی به عوامل چندی بستگی دارد از جمله: نوع سامانه شیمیایی و خواص فیزیکی - شیمیایی مانند اختلاف وزن‌های مخصوص دو فاز، کشش بین سطحی و گرانشی‌ها، ارتفاع مایع فاز پراکنده در میکروپورت، قطر داخلی و خارجی لوله مویینه، خاصیت ترشوندگی یا عدم ترشوندگی دیواره خارجی لوله مویینه توسط فاز پراکنده، زاویه نصب لوله مویینه نسبت به خط قائم، درجه باز کردن شیر میکروپورت و سرعت باز و بسته نمودن آن، نحوه تراش و صیقل دادن نوک لوله مویینه [۱۵، ۱۶].

پراکنده (فاز سنگین)، در طرفین بدنه اصلی دستگاه، که به ترتیب به انتهای دستگاه و انتهای فنجان متصل می‌باشند. ۳- لوله خروجی و تخلیه محتویات درون دستگاه در انتهای بدنه، و لوله خروجی هوا در قسمت بالای کلاهک دستگاه.

دستگاه برای جلوگیری از وارد شدن هرگونه ارتعاش خارجی، بر روی تخته چوبی مقاوم نصب، و سپس به پایه‌های فلزی مقاوم در شرایط کاملاً تراز متصل گردیده است. آنگاه کل دستگاه در محلی به دور از جریان‌های جابجایی محیط اطراف قرار داده شده است. به منظور جلوگیری از ورود آلودگی‌های احتمالی، از هیچ ماده چرب کننده‌ای در اتصالات شیشه‌ای استفاده نشده است. نصب لوله‌های مویینه به انتهای میکروپورت، توسط فنرهای فولادی ضدزنگ صورت گرفته است.

قبل از انجام هر آزمایش؛ جهت حذف چربی‌ها و آلودگی‌های احتمالی، کلیه قسمت‌های دستگاه در محلول تازه و داغ اسید کرومیک در آب به غلظت ده درصد ($\frac{10\text{g}}{100\text{cc}}$)، غوطه‌ور و آنگاه با آب مقطر و ماده استون شسته و در نهایت توسط اجاق خشک می‌گردید. در تمام مراحل حمل و نصب قطعات دستگاه، نهایت دقت برای تمیز ماندن آن شده است.

جدول (۱)، مشخصات کلی دستگاه پیوند قطره - فصل مشترک را، ارائه می‌دهد.

جدول ۱: مشخصات کلی دستگاه پیوند قطره - فصل مشترک.

قطر داخلی و خارجی بدنه اصلی دستگاه	۸/۵ و ۸/۰ سانتی‌متر
قطر داخلی و خارجی فنجان گیرنده	۴/۵ و ۵/۰ سانتی‌متر
ارتفاع بدنه اصلی دستگاه	۴۰ سانتی‌متر
ارتفاع فنجان گیرنده	۴/۶ سانتی‌متر
حجم مخازن تغذیه فازها	۲۴۰/۰ میلی‌لیتر
حجم میکروپورت	۱۰/۰ میلی‌لیتر

نحوه عملکرد دستگاه: فاز پراکنده، ابتدا از طریق مخزن تغذیه سمت راست، وارد فنجان گیرنده شده، پس از پرمودن و لبریز شدن، به محیط بیرون فنجان و پایین بدنه منتقل می‌شود (شیر تخلیه دستگاه بسته است). عمل عملکرد دستگاه تا غوطه‌وری کامل نوک لوله مویینه مستقر در بالای دستگاه ادامه یافته، سپس قطع می‌شود. آنگاه از طریق مخزن سمت چپ، فاز سبک و پیوسته به انتهای دستگاه وارد و به دلیل سبک بودن، پس از صعود از ورای فاز پراکنده در بالای آن قرار می‌گیرد و

ماده شیمیایی، آزمایش سه بار تکرار، و متوسط گرفته شد. مقادیر کشش بین سطحی، توسط تنشیومتر دیجیتالی، با نام کروس مدل KIOT ساخت آلمان (Krüss KIOT, Wilhelmy plate, GMBH Hamburg Germany)، با استفاده از روش صفحه پلاتین انجام گردید. و اندازه گیری برای هر ماده شیمیایی، دوازده مرتبه تکرار گردید و به دلیل آنکه در بعضی از موارد در اثر جدایی زود هنگام صفحه از فصل مشترک، گسیختگی لایه مشترک زودتر از موعد صورت می گرفت، حداکثر مقدار کشش بین سطحی، به عنوان مقدار نهایی در نظر گرفته شده است. جدول (۲)، مقادیر اندازه گیری شده خواص فیزیکی سامانه های شیمیایی مورد استفاده را در دمای آزمایشگاه، مشخص نموده است.

تعیین قطر قطره در هر سامانه شیمیایی و قبل از تکرار هر آزمایش، از طریق شمارش تعداد قطرات خروجی از لوله موئینه (به طور متوسط ۴۰ قطره) و ثبت حجم مصرف شده در میکروپورت در سرعت های مختلف تولید قطره و درجه های گوناگون باز بودن شیر خروجی آن صورت گرفت و فرض کروی بودن قطرات در عمل ثابت گردید. محدوده قطر قطره در هر سامانه شیمیایی به ازای لوله های موئینه ذکر شده، متفاوت بود که ناشی از خواص فیزیکی - شیمیایی آنها می بود.

برای هر سامانه شیمیایی مندرج در جدول (۲)، به ازای هر قطر معین قطره، آزمایش تعیین زمان پیوند قطره - فصل مشترک، در شش ارتفاع سقوط ($\Delta L = 0.5 \text{ cm}$, $1.5 \leq L \leq 4 \text{ cm}$)، حداقل ۴۰ مرتبه و حداکثر ۶۰ مرتبه تکرار گردید. نتایج تکرار آزمایش بسیار خوب، قابل تجدید و تکرار بود، و به دلیل کنترل دستگاه از نظر عدم وجود آلودگی احتمالی، نتایج کاملاً قابل مقایسه ای به دست آمد. با تنظیم شیر میکروپورت، نظام تولید تک قطره ایجاد می شد و

انتخاب مواد شیمیایی برای انجام آزمایش، در درجه نخست براساس استانداردهای ارائه شده توسط بخش اجرایی فدراسیون اروپایی مهندسی شیمی؛ در زمینه های تقطیر، جذب و استخراج مایع - مایع [۱۷]، و همچنین ملاحظات آزمایشگاهی صورت گرفته است. دیگر معیارهای انتخاب عبارت است از: سهولت تهیه و دسترسی، قرار گرفتن در محدوده مناسب خواص مهم فیزیکی - شیمیایی، غیرقابل اشتعال بودن و دارا بودن حداقل درجه سمی بودن، و کمترین میزان ضررهای پوستی، تنفسی و چشمی، سهولت بازیابی، و ایجاد قطرات قابل مشاهده و کروی برای فاز پراکنده قطره.

فرآیند آزمایش پیوند قطره در حالت سامانه (سیستم) دو جزئی شیمیایی، بدون وقوع انتقال جرم، و بدون وجود مواد فعال سطحی صورت گرفته است. قبل از انجام آزمایش در هر سامانه شیمیایی، به منظور جلوگیری از انتقال جرم، فازهای آلی و آبی نخست با یکدیگر مخلوط و نسبت به هم اشباع گردیده، سپس از هم جدا شده اند. در همه آزمایش ها، از آب یک بار تقطیر شده، استفاده شده است. اندازه گیری خواص فیزیکی مواد پس از اشباع متقابل از یکدیگر، در دمای آزمایشگاه (25°C) به شرح زیر صورت گرفت:

اندازه گیری جرم های مخصوص، توسط چگالی سنج (پیکنومتر) دارای حجم ۲۵ میلی لیتر و ترازوی به دقت ۰/۰۰۱ گرم انجام گردید. آزمایش برای هر ماده شیمیایی، سه بار تکرار و متوسط گرفته شد.

مقدار گرانیروی (ویسکوزیته) فازها، توسط ویسکومتر شیشه ای مدل کانون - فنسک، ساخت آلمان (Cannon - Fenske; Petrotest Instrument, GMBH & Co KG) و با استفاده از زمان سنج به دقت ۰/۰۱ ثانیه انجام گردید. در این مورد نیز برای هر

جدول ۲: خواص فیزیکی سامانه های شیمیایی مورد آزمایش ($T = 25^\circ \text{C}$).

فاز پیوسته (c) - فاز قطره (d)	ρ_c (kg/m^3)	ρ_d (kg/m^3)	μ_c (mPa.s)	μ_d (mPa.s)	σ (mN/m)	μ_d / μ_c
تولون - آب	۸۶۲/۱	۹۹۶/۸۴	۰/۶۶۸۹	۰/۸۱۴	۳۶/۱	۱/۲۱۷
نرمال هپتان - آب	۶۸۳/۷	۹۹۷/۰	۰/۴۵۰۹	۰/۸۵۶	۵۰/۱	۱/۹۰۱
تولون - محلول (۰/۶۰ حجمی)						
گلیسرین در آب	۸۶۰/۰	۱۱۳۹/۱	۰/۵۸۰۵	۷/۴۱۴	۵۳/۴	۱۲/۷۷۲

پیوسته تولون، نسبت به قطرات آبی گلیسیرین، مسئله اختلاف زیاد بین گرانبه‌های تولون و محلول آبی گلیسیرین در این دو سامانه تاثیر چندان نداشته، زمان‌های تشکیل قطره در هر دو سامانه معادل می‌باشد.

در مورد زمان سقوط قطرات، با توجه به محدوده قطر قطرات در سامانه‌های مختلف، نتایج از همخوانی و هماهنگی برخوردار می‌باشد. در هر سه سامانه، در مقادیر کم ارتفاع سقوط، پیوندهای آبی با زمان پیوند کمتر از ۰/۱ ثانیه به کرات، ملاحظه گردید. وقوع پدیده پیوند چند مرحله‌ای قطرات آب در فصل مشترک تولون، شدید بوده و در هر چهل بار تکرار آزمایش برای هر قطر مشخص قطره، ۲۶ مورد، دچار این پدیده می‌شد (۶۵ درصد قطرات). این مسئله در قطرات آب بر روی فصل مشترک نرمال هپتان، از افت قابل ملاحظه‌ای برخوردار گردید و حداکثر چهار قطره از هر چهل قطره (۱۰ درصد قطرات)، به این مسئله دچار می‌گردید. بنابراین با اطمینان کامل، از مسئله پیوند چند مرحله‌ای در سامانه آب - نرمال هپتان، صرف نظر گردید.

در مورد قطرات آبی ۶۰ درصد حجمی گلیسیرین در فصل مشترک تولون، پیوند چند مرحله‌ای به هیچ وجه ملاحظه نگردید و این نتیجه با توجه به مقدار بالای نسبت $\frac{\mu_d}{\mu_c}$ طبق جدول (۲)، قابل انتظار می‌بود. همچنین طبق جدول مذکور، افزایش مقدار کشش بین سطحی از سامانه اول به سوی سامانه سوم، باعث جلوگیری از وقوع پیوند چند مرحله‌ای شده است. حداکثر تعداد مراحل پیوند در آزمایش‌های سامانه آب - تولون، به پنج مرحله می‌رسید. بسته به اندازه قطره اولیه، مقدار اندازه قطره ثانویه در حد تقریبی یک تا دو میلی‌متر بود و با فصل مشترک کرووی تشکیل می‌گردید. در همه آزمایش‌ها مشاهده گردید که زمان پیوند قطره مرحله دوم، حداقل برابر با زمان پیوند مرحله اول و همواره بیشتر از آن است. زمان پیوند مرحله سوم و

برای فروکش کردن اغتشاشات ناشی از پیوند قطره در روی فصل مشترک، فاصله زمانی خروج بین دو قطره متوالی از لوله مویینه برابر با مدت ۳ دقیقه، در نظر گرفته شده بود. مسیر حرکت قطره از ابتدای خروج از لوله مویینه تا رسیدن به فصل مشترک، قابل رویت بوده و اندازه‌گیری زمان پیوند از لحظه جدایی قطره و طی مسیر تا مرحله پیوند و محو شدن آن در فصل مشترک، توسط زمان سنج با دقت ۰/۰۱ ثانیه اندازه گرفته می‌شد [۵]. برای سامانه تولون - آب، که دارای پیوند چند مرحله‌ای می‌باشد، بلافاصله پس از محو شدن قطره اولیه، زمان سنج اول متوقف و توسط زمان سنج دوم با دقت ۰/۱ ثانیه، کل زمان پیوند مراحل دوم الی آخر ثبت می‌گردید [۸،۷].

همچنین، در هر آزمایش مجزا در هر سامانه شیمیایی، زمان تشکیل قطره در نوک لوله مویینه و زمان سقوط آن از لوله تا فصل مشترک دو فاز اندازه گرفته شده است.

بررسی نتایج آزمایش‌ها و بحث نهایی

با توجه به سامانه‌های شیمیایی انتخاب شده، در جدول (۳)، نتایج اندازه‌گیری قطر قطرات، محدوده زمانی تشکیل قطرات در نوک لوله مویینه و همچنین محدوده زمان سقوط قطره، در محدوده ارتفاع بین اعداد ۱/۵ تا ۴ سانتی‌متری، نسبت به فصل مشترک دو فاز، درج شده است.

با توجه به مشاهدات تجربی، شکل نهایی قطره و فصل مشترک نسبت به یکدیگر، در هر سه سامانه شیمیایی، کرووی ملاحظه گردید. طبق جدول (۳)، در مقایسه با زمان تشکیل قطرات آب در محیط نرمال هپتان، قطرات آبی گلیسیرین در محیط پیوسته تولون، به دلیل مقدار بالای ویسکوزیته فاز گلیسیرین، زمان تشکیل بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین به دلیل بزرگ‌تر بودن اندازه قطرات آب در محیط

جدول ۳: محدوده مقادیر اندازه‌گیری شده قطر قطرات، زمان تشکیل و سقوط قطره در سامانه‌های شیمیایی مورد آزمایش.

زمان سقوط	زمان تشکیل	اندازه قطره	فاز پیوسته (c) - فاز قطره (d)
t_{fal} (s)	t_{for} (s)	d_i (mm)	
۰/۱۹ - ۰/۴۲	۱/۴۸ - ۵/۰۶	۷/۹۸۲ - ۸/۸۳۶	تولون - آب
۰/۲۰ - ۰/۳۳	۰/۹۵ - ۴/۲۲	۶/۱۳۲ - ۷/۴۲۶	نرمال هپتان - آب
۰/۲۲ - ۰/۳۶	۰/۳۲ - ۶/۰۲	۴/۳۱۴ - ۶/۳۴۰	تولون - محلول (۶۰٪ حجمی) گلیسیرین در آب

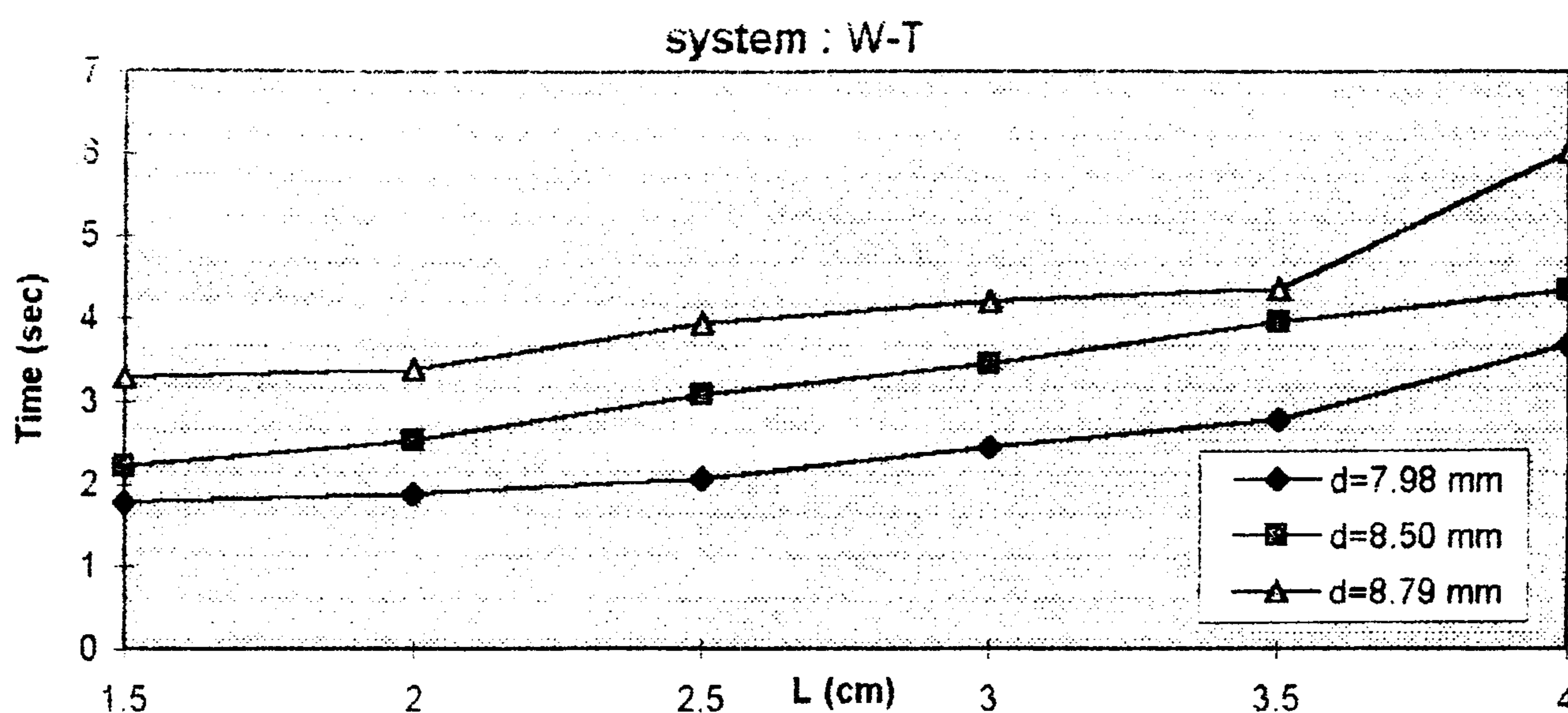
بدین دلیل است که، در حالت طبیعی استقرار قطره بر روی فصل مشترک و تشکیل لایه حایل، فرآیند تخلیه لایه و در نتیجه نازک شدن آن آغاز می‌گردد. در اثر ضربه قطرات مجاور یا سقوط کننده متوالی و اغتشاشات سطحی فصل مشترک، قطره دچار جابجایی افقی روی سطح گردیده بنابراین، مکان استقرار آن تغییر می‌یابد که خود باعث تجدید سطح و نو شدن لایه حایل زیر قطره می‌شود و مجدداً فرآیند تخلیه آغاز می‌شود و در کل، ایجاد نوسان و اغتشاش درونی باعث پایداری قطره می‌شود. هم‌چنین بنا به مشاهده و تجربه، با وارد کردن ضربه‌های ملایم به دستگاه و ایجاد اغتشاش خارجی، مجدداً مسئله پایداری قطره بر روی فصل مشترک ملاحظه می‌گردید.

در موارد بسیار نادر، وجود نوسان شدید در روی فصل مشترک، به خصوص در هنگام انجام پدیده پیوند قطره قبلی باعث می‌گشت که قطره بعدی در هنگام سقوط و استقرار در مکان گسیختگی لایه مربوط به قطره قبل از خود، بلافاصله دچار پیوند آبی و خود به خود گردد.

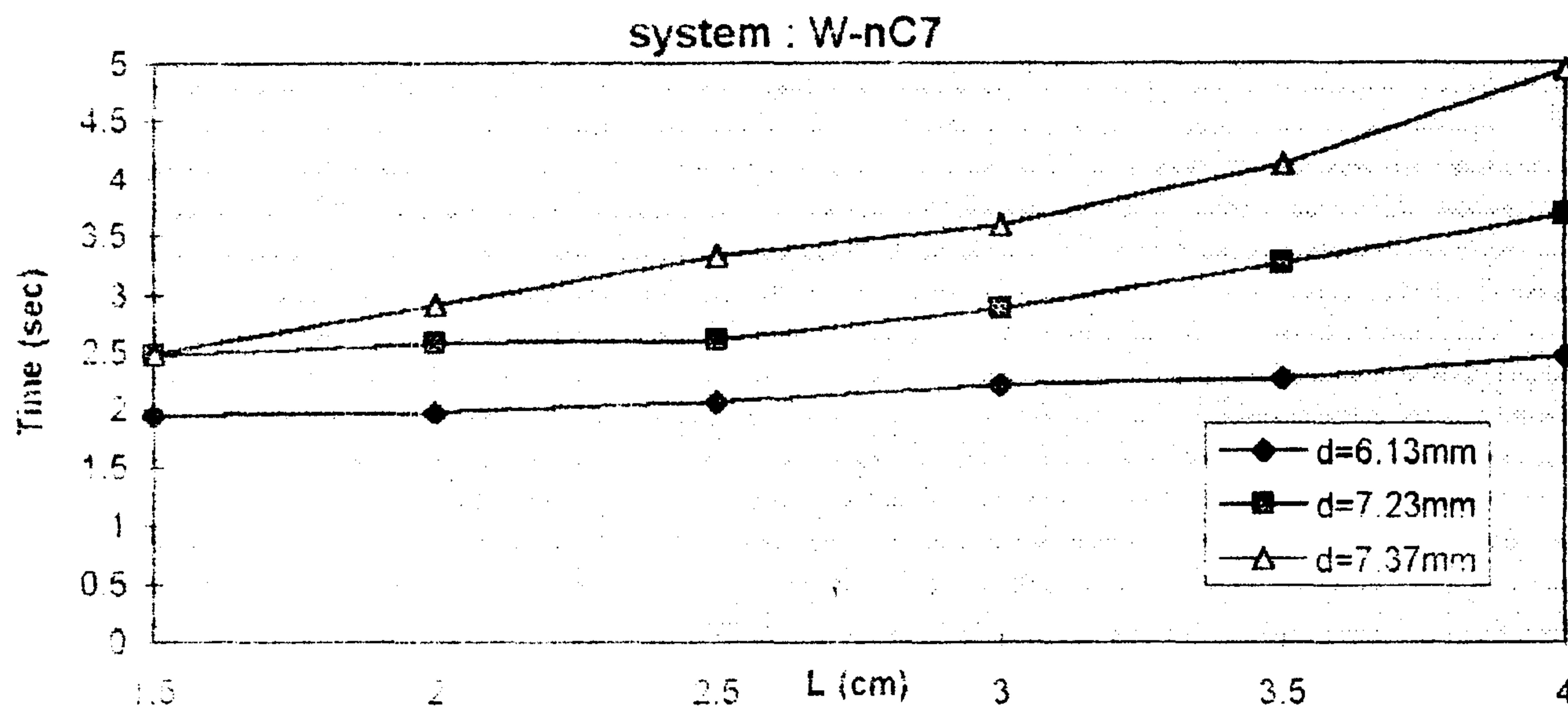
نتایج آزمایش تغییرات زمان مرحله اول پیوند قطره - فصل مشترک بر حسب ارتفاع سقوط و قطر قطره در سامانه تولوئن - آب، در شکل (۳) رسم شده است. هم‌چنین نتایج آزمایش تغییرات زمان پیوند قطره - فصل مشترک در سامانه‌های نرمال هپتان - آب، و تولوئن - محلول آبی ۶۰٪ حجمی گلیسرین، به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) رسم شده است. همانگونه که در ابتدای بحث ذکر گردید این دو سامانه فاقد پیوند چند مرحله‌ای می‌باشند.

مرحله‌های احتمالی دیگر در مقایسه با مرحله اول و دوم بسیار ناچیز و در حد میلی ثانیه بود. هم‌چنین در این سامانه شیمیایی، قطره پس از فرود آمدن بر فصل مشترک و استقرار بر روی آن و بدون داشتن هیچ گونه نوسان عمودی و عدم وجود اغتشاشات فصل مشترک، به وضعیت پایدار می‌رسید و در این شرایط احتمال وقوع پیوند چند مرحله‌ای بسیار زیاد می‌گردید. ایجاد قطره مرحله دوم پس از محو شدن قطره اولیه و به صورت جریان پرتابه از محل پیوند قطره اولیه به محل مجاور آن انجام شده و سبب نوسان شدید سطحی می‌شد. اغتشاشات درونی فصل مشترک، ناشی از پیوند چند مرحله‌ای قطره قبلی سبب پایداری قطره منفرد سقوط کننده بعدی می‌گردید و در بعضی از موارد در مرحله دوم پیوند، دو قطره به طور همزمان از قطره اولیه حاصل می‌گردید که بسیار نادر بود. تکرار آزمایش تا جایی که به آلودگی فصل مشترک منتهی می‌گردید، سبب سوق دادن پیوند چند مرحله‌ای به سوی پیوند یک مرحله‌ای می‌شد. در هر سه سامانه شیمیایی ملاحظه شد که در اثر ضربه قطرات منفرد متوالی سقوط کننده بر قطره اولیه، این قطره بسیار پایدار شده ولی قطرات مذکور بلافاصله با فصل مشترک پیوند حاصل می‌نمودند. در هر سه سامانه، وجود هرگونه اغتشاشات درونی فصل مشترک و نیز ضربات ناشی از قطرات احتمالی موجود بر روی آن و تصادم آنها با قطره مورد آزمایش، سبب پایداری و افزایش زمان پیوند آن، می‌گردید.

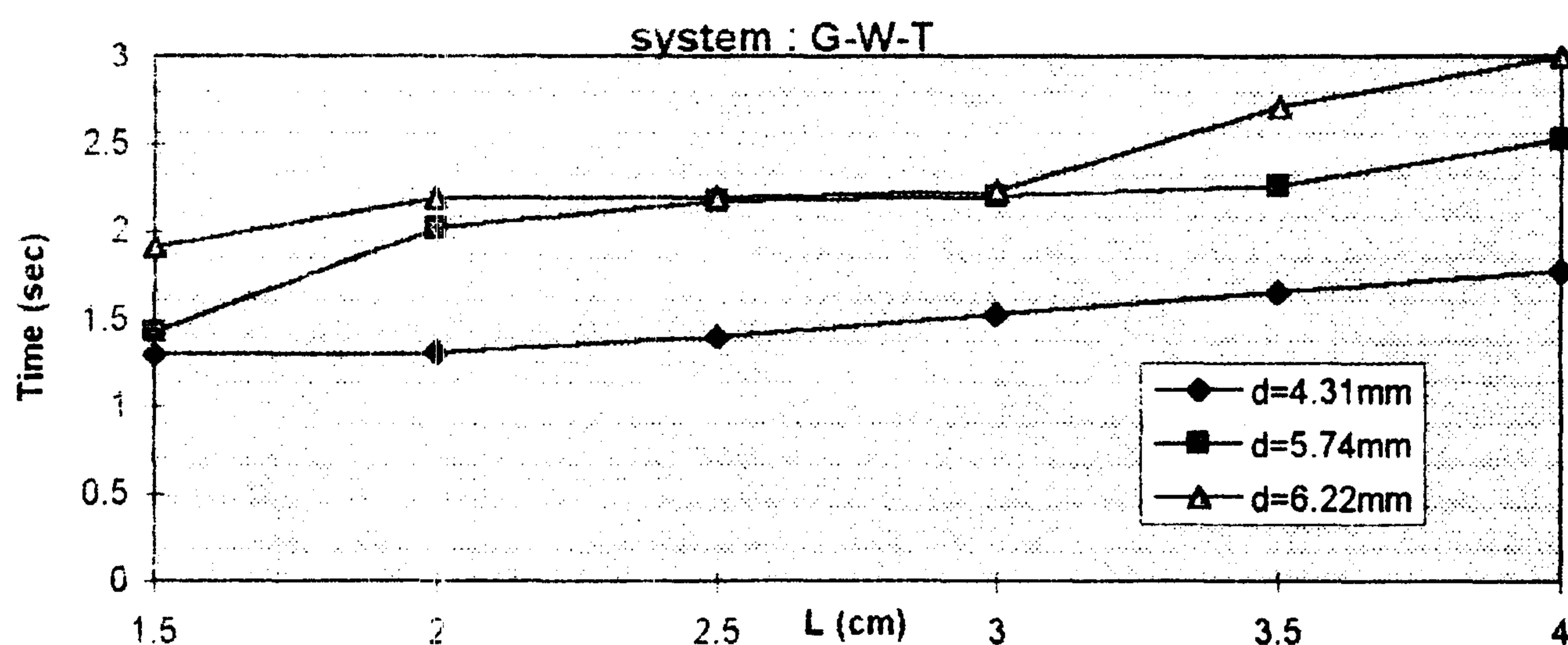
بنابراین نتایج، مبین پایدار شدن قطره و افزایش زمان پیوند در اثر اعمال اغتشاش، نوسان و ضربه نسبت به آن، می‌باشد. توجیه دلیل پایداری قطره در اثر اعمال اغتشاشات درونی



شکل ۳: تغییرات زمان مرحله اول پیوند قطره آب با فصل مشترک تولوئن - آب.



شکل ۴: تغییرات زمان پیوند قطره آب با فصل مشترک نرمال هپتان - آب.



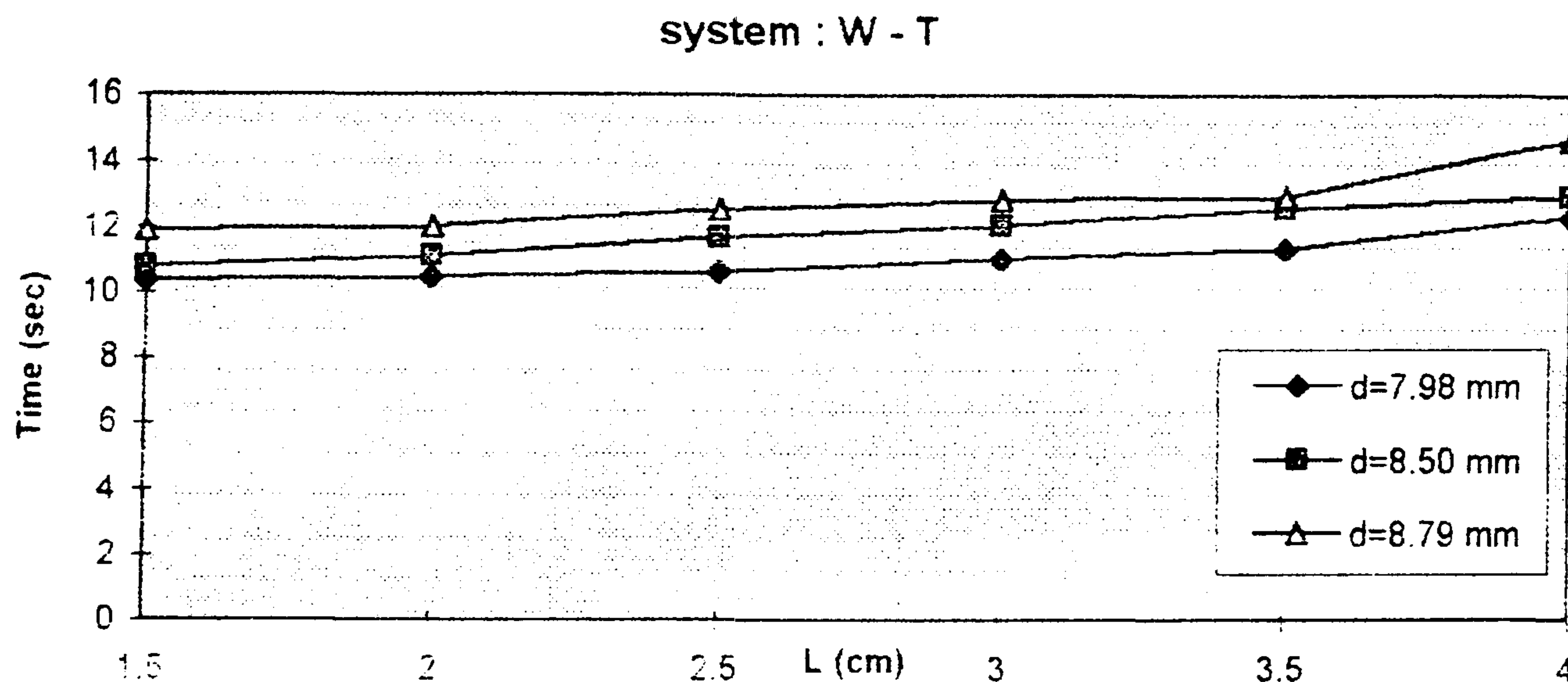
شکل ۵: تغییرات زمان پیوند قطره ۶۰٪ حجمی گلیسرین در آب با فصل مشترک تولوئن - محلول ۶۰٪ حجمی گلیسرین در آب.

مرحله‌ای قطره آب بر روی فصل مشترک تولوئن، بر حسب ارتفاع سقوط و قطر قطره، رسم شده است. همانند منحنی زمان پیوند مرحله اول (شکل ۳)، ملاحظه می‌گردد که با افزایش ارتفاع سقوط و قطر قطره بر میزان زمان پیوند افزوده شده است. در شکل (۷)، نحوه تغییرات زمان پیوند مرحله‌های دوم تا پنجم پیوند چند مرحله‌ای قطره آب بر روی سطح تولوئن، بر حسب ارتفاع سقوط و قطر قطره رسم شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با افزایش ارتفاع، زمان مذکور کاسته می‌شود که این کاهش با افزایش قطر قطره شدیدتر است. در این سامانه افزایش قطر قطره در یک ارتفاع مشخص و افزایش ارتفاع در یک قطر مشخص قطره، به ترتیب سبب کاهش ۷۵ و ۶۰ درصدی از تعداد کل مراحل پیوند تک قطره می‌شود.

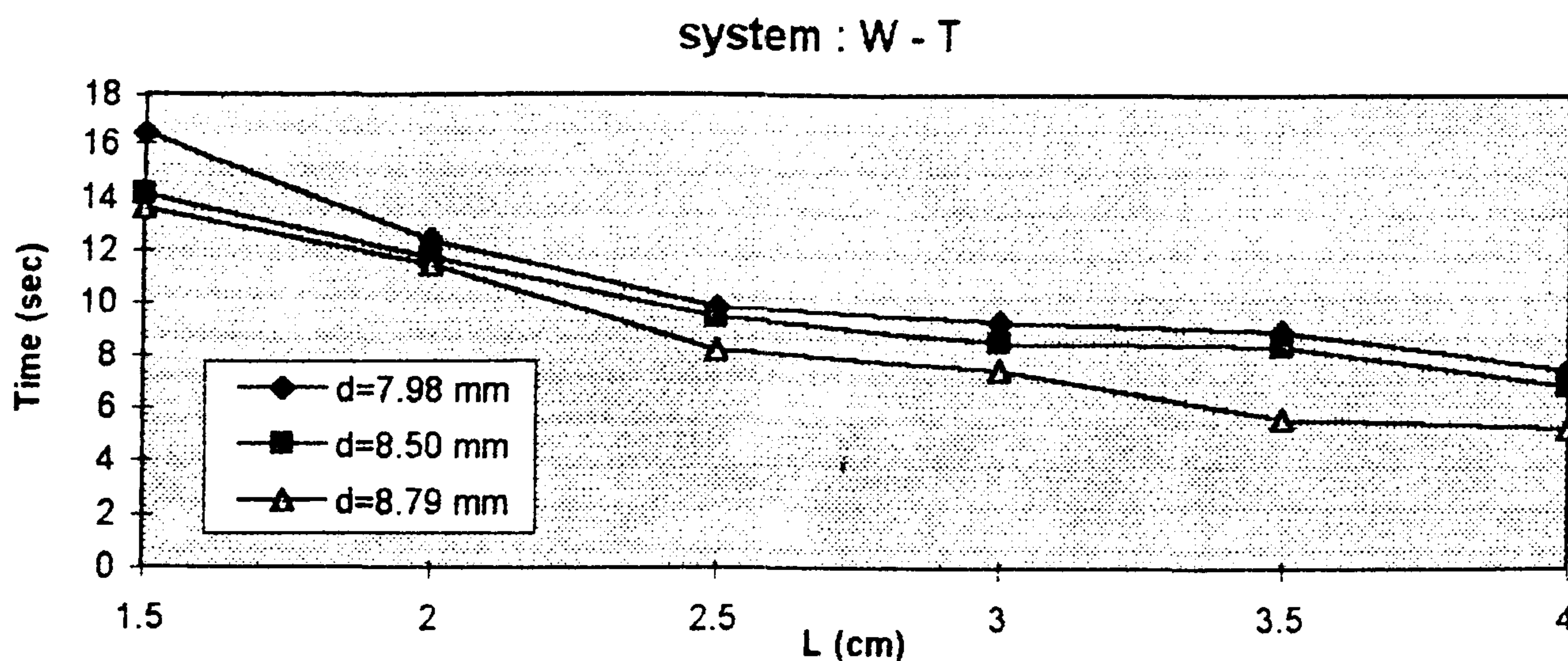
با توجه به این سه شکل، در هر سه سامانه شیمیایی، با افزایش قطر قطره و افزایش ارتفاع سقوط، بر مقدار زمان پیوند قطره - فصل مشترک افزوده می‌شود. همچنین مشاهده می‌گردد که تأثیر افزایش ارتفاع بر روی زمان پیوند، با افزایش قطر قطره در هر سامانه بیشتر می‌شود که این امر از روی افزایش شیب منحنی‌ها مشخص است.

با توجه به شکل‌های سه‌گانه مذکور، با افزایش مقدار کشش بین سطحی (σ) و مقدار نسبت گرانشی فازها ($\frac{\mu_d}{\mu_c}$)، از تأثیر افزایش ارتفاع بر روند افزایش زمان پیوند، کاسته می‌شود.

از طرفی، با مقایسه نتایج تجربی منطبق بر منحنی‌های مذکور مشاهده می‌گردد که، تأثیر افزایش قطر قطره بر سیر افزایش زمان پیوند در سامانه‌های دارای کشش بین سطحی کمتر (تولوئن - آب)، مشهودتر است. در شکل (۶)، زمان کل پیوند چند



شکل ۶: تغییرات زمان کل پیوند چند مرحله‌ای قطره آب با فصل مشترک تولوئن - آب.



شکل ۷: تغییرات زمان مرحله‌های دوم تا پنجم پیوند قطره آب با فصل مشترک تولوئن - آب.

نتیجه‌گیری

بنابراین، لازم است نتایج آزمایشگاهی مذکور، در هنگام افزایش مقیاس به حالت‌های نیمه صنعتی و صنعتی مورد توجه قرار گیرد تا با تنظیم میزان زمان پدیده پیوند قطره - فصل مشترک، از تجمع و انباشتگی قطرات در بخش جداسازی برج‌های استخراج، که خود عامل کاهش بازده انتقال جرم می‌باشد جلوگیری به عمل آید.

فهرست علائم (نامگان)

- حروف لاتین

a: سطح تماس قطره با لایه حایل، cm^2

b: شعاع قطره، mm

c: ثابت پیوند قطره - فصل مشترک

d: قطر قطره، mm

پس از بررسی عوامل فیزیکی - شیمیایی و عملیاتی موثر بر روی پدیده پیوند قطره با فصل مشترک فاز همگون؛ که از نقش مهمی در فرآیند استخراج مایع - مایع برخوردار می‌باشد، ملاحظه گردید که با افزایش اندازه قطر قطره و ارتفاع سقوط آن، بر مقدار زمان پیوند قطره افزوده می‌شود و شدیدترین حالت وجود پدیده پیوند مرحله‌ای در سامانه تشکیل یافته از قطرات آب در فاز پیوسته تولوئن به وقوع می‌پیوندد که دلیل آن کمتر بودن مقادیر خواص کشش بین سطحی و گرانشی آن، نسبت به دو سامانه شیمیایی دیگر مورد آزمایش می‌باشد. هم چنین افزایش اندازه قطره و ارتفاع سقوط در این سامانه، باعث کاهش تعداد مراحل پیوند می‌گردد. در همه سامانه‌ها، نوسان‌های عمودی و افقی قطره باعث پایداری و افزایش عمر آن می‌شود.

t_{for} , t_{fa} : زمان تشکیل و سقوط قطره، s	F : نیرو، N
v : حجم قطره، cm^3	g : ثابت جاذبه، cm/s^2
- حروف یونانی	h : ضخامت لایه حایل، μm
μ_c و μ_d : گرانیوی فازهای پیوسته و قطره، mPa.s	L : ارتفاع سقوط یا صعود قطره، cm
π : عدد ۳/۱۴	N : تعداد قطرات پیوند نیافته در زمان t
ρ_c , ρ_d : جرم‌های مخصوص فاز پیوسته و قطره، kg/m^3	r : شعاع برش استوانه‌ای لایه حایل، mm
σ : کشش بین سطحی، mN/m	R : شعاع انحناى قطره و فصل مشترک، mm
Δ : علامت تفاضل دو مقدار	t : زمان پیوند قطره با فصل مشترک، s

مراجع

- Hartland, S. and Jeelani, S. A. K. (1994). "Gravity settlers." In J. C. Godfrey and M. J. Slater, eds., *Liquid-Liquid extraction equipment, 1/e*, John Wiley and Sons, New York, Ch.13, P. 411.
- Hartland, S. (1988). "Coalescence in dense-packed dispersions." In I. B. Ivanov, ed., *Thin Liquid Films*, Marcel Dekker, New York, Ch.10, P. 633.
- Jeelani, S. A. K. and Hartland, S. (1998). "Effect of dispersion properties on the separation of batch liquid-liquid dispersions." *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 37, No. 9, PP. 547-554.
- Davies, G. A. (1992). "Mixing and coalescence phenomena in liquid-liquid systems." In J. D. Thornton, ed., *Science and Practice of Liquid-Liquid Extraction, 1/e*, Oxford, Vol. 1, Ch. 5, P. 244.
- Jeffreys, G. V. and Davies, G. A. (1975). "Coalescence of liquid droplets and liquid dispersions." In C. Hanson, ed., *Recent Advances in Liquid-Liquid Extraction*, Pergamon Press, Ch. 14, P. 495.
- Laddha, G. S. and Degaleesan, T. E. (1991). "Dispersion and Coalescence." In T. C. Lo, M. H. I. Baird and C. Hanson, eds., *Handbook of Solvent Extraction, 1/e*, (1983), John Wiley and Sons, New York, reprint by Krieger, Malabar, Florida, Ch. 4, P. 125.
- Nikolov, A. D. and Wasan, D. T. (1995). "Effects of surfactant on multiple stepwise coalescence of single drops at liquid-liquid interfaces." *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 34, No. 10, PP. 3653-3661.
- Sinegribova, O. A., Andreev, A. Yu., Voronin, O. V. and Dvoeglazov, K. N. (1993). "The influence of Silicic acid on the coalescence of drops in the extraction system TBP-HNO₃ (HCl)." In D. H. Logsdail and M. J. Slater, eds., *Solvent Extraction in the Process Industries*, Elsevier, London, Vol. 3, PP. 1828-2835.
- Kralchevsky, P. A., Danov, K. D. and Denkov, N. D. (1997). "Chemical physics of colloid systems and interfaces." In K. S. Birdi, ed., *Handbook of Surface and Colloid Chemistry*, CRC Press, Boca Raton, Florida, Ch. 11, P. 333.
- Chesters, A. K. (1991). "The modelling of coalescence processes in fluid-liquid dispersion : a review of current understanding." *Trans. IChemE.*, Vol. 69, Part A, PP. 259-270.
- Lobo, L., Ivanov, I. and Wasan, D. (1993). "Dispersion coalescence kinetic stability of creamed dispersions." *AIChE J.*, Vol. 39, No. 2, PP. 322-334.
- Jeelani, S. A. K. and Hartland, S. (1991). "Effect of approach velocity on binary and interfacial

- coalescence." *Trans. IChemE.*, Vol. 69, Part A, PP. 271-281.
- 13 - Ivanov, I. B., Danov, K. D. and Kralchevsky, P. A. (1999). "Flocculation and coalescence of micron-size emulsion droplets." *Colloids and Surfaces, A: Physico Chemical and Engineering Aspects*, Vol. 152, PP. 161-182.
- 14 - Baird, M. H. I. (1991). "Solvent extraction - The Challenge of a mature technology." *The Can. J. of Chem. Eng.*, Vol. 69, No. 6, PP. 1287-1301.
- ۱۵ - موسویان، س.م.ع.؛ بهمنیار، ح.؛ خدیویپارسی، پ. و ایوانی، ج. "بررسی و تحلیل اثر اندازه قطر و ارتفاع سقوط قطره بر پدیده پیوند قطره با فصل مشترک فاز همگون." پنجمین کنگره ملی و چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی شیمی ایران، اردیبهشت ۱۳۷۹، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، ص ۶۵۳ - ۲، ۶۶۱ - ۲، (۱۳۷۹).
- 16 - Miller, R. and Fainerman, V. B. (1998). "The drop volume technique." In *D. Möbius and R. Miller, eds. Drops and Bubbles in Interfacial Research, 1/e*, Elsevier, Amsterdam, Ch. 3, P. 139.
- 17 - Bart, H.-J., Berger, R., Mišek, T., Slater, M. J., Shröter, J. and Wachter, B. (1994). "Recommended systems for liquid extraction studies." In *J. C. Godfrey and M. J. Slater, eds., Liquid-Liquid Extraction Equipment, 1/e*, John Wiley and Sons, New York, Ch. 3, P. 15.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Drop - Interface Coalescence
- 2 - Coalescence Cell
- 3 - Surfactants
- 4 - Liquid - Liquid Extraction
- 5 - Dispersed Phase
- 6 - Continuous Phase
- 7 - Drop - Drop Coalescence
- 8 - Intervening Film
- 9 - Pre-Drainage Time
- 10 - Drainage Time
- 11 - Rupturing Time
- 12 - Mixing Time
- 13 - Multi-Step or Partial Coalescence
- 14 - Uniform Film
- 15 - Non - Uniform Film
- 16 - Parallel Disc
- 17 - Hemisphere Drop
- 18 - Rigid (Deformable) Drop-Deformable Interface
- 19 - Planar-Spherical Model