الجمهورية العربية السورية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الميكانيك العام

تطوير عمل جهاز قياس لزوجة السوائل العادية لقياس لزوجة السوائل النانوية

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة ميكانيك السوائل

إعداد المهندسة :

عروبه شهاب نصر

إشراف الاستاذ الدكتور المهندس :

علي خلوف

أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة دمشق

عام (2022-2023) م

فهرس المحتويات

المستخلص (Abstract)	13
المقدمة(Introductions)	15
مشكلة البحث(Research Problem)	15
تساؤلات البحث (Questions)	15
فرضيات البحث (Research Assumes)	15
مسلمات البحث (Postulates of Research)	15
الهدف من البحث (Aim of Research)	16
أهمية البحث (Importance of Research)	16
مبررات البحث (Research Rational)	16
مصطلحات البحث (Keywords)	17
محدوديات البحث (Research Limitations)	17
التعريفات(Definitions)	18
الفصل الأول : الدراسات المرجعية(Literature Review)	21
1.1الدراسة الأولى : (إجراء تحقيقات تجريبية للزوجة السوائل النانوية في درجات الحرارة المنخفضة)	22

1.1.1 الهدف من الدراسة (Aim of the study)	22
2.1.1 نتائج الدراسة (The study results)	23
2.1الدراسة الثانية: (إجراء تحقيقات تجريبية للزوجة السوائل النانوية غليكول الإيثلين المستقر والألومينا في الماء عند تراكيز مختلفة)	26
1.2.1 الهدف من الدراسة (Aim of the study)	26
2.2.1 نتائج الدراسة (The study results)	27
3.1 الدراسة الثالثة : (تأثير خواص الضغط على اللزوجة للسوائل النانوية مثل ثنائي إيثلين الغليكول القائمة على أساس MgAL2O4)	32
1.3.1 الهدف من الدراسة (Aim of the study)	32
2.3.1 نتائج الدراسة (The study results)	33
4.1 الدراسة الرابعة : (إجراء تحقيقات تجريبية للزوجة السوائل النانوية Zno القائمة على اساس إيثلين غليكول EG)	34
1.4.1 الهدف من الدراسة (Aim of the study)	35
2.4.1 نتائج الدراسة (The study results)	35
5.1 الدراسة الخامسة : (تأثير حجم الجسيمات على لزوجة السوائل النانوية)	36
1.5.1 الهدف من الدراسة (Aim of the study)	37

2.5.1 نتائج الدراسة (The study results)	38
6.1 الدراسة السادسة :(تأثير تركيز الجسيمات والمواد على لزوجة السوائل النانوية)	39
1.6.1 الهدف من الدراسة (Aim of the study)	39
2.6.1 نتائج الدراسة (The study results)	39
7.1الخلاصة من الدراسات السابقة	41
الفصل الثاني: مبادئ عمل أجهزة قياس لزوجة السوائل النانوية والعادية (Working principles of viscometers for nanofluids and liquids)	43
1.2 تمهيد Introduction	44
2.2مفهوم نموذج التجميع (Aggregation Model)	46
3.2 مفهوم كثافة التجميع(Aggregation Density)	48
4.2 كثافة المحلول المتجانس(Density of ahomogeneous solution)	48
5.2 النماذج الاساسية لحساب لزوجة السائل النانوي	49
1.5.2 نموذج أينشتاين (Einstein Model)	49
2.5.2 نموذج برينكمان(Brinkman Model)	50
5.2. 3 نموذج فرانكل واكريفوس(Frankel Wakrevos Model)	50
5.2. 4 نموذج باتشيلور(Bachelor Model)	51

5.5.2 نموذج غراهام(Graham's Model)	51
6.2 اللزوجة الفعلية للسوائل النانوية(Actual Viscosity)	51
7.2 لزوجة السوائل العادية	51
1.7.2 تصنف أجهزة قياس لزوجة السوائل العادية	55
1.1.7.2 جهاز الفيسكوميتر (Viscometer)	56
1.1.1.7.2فيسكوميتر اوستوالد (Ostwald Viscometer)	56
2.1.1.7.2فيسكوميتر الفقاعات (Bubble Viscometer)	58
3.1.1.7.2فيسكوميتر الكره الساقطة(Falling Sphere Viscometer)	59
4.1.1.7.2فيسكوميتر الغزل المغناطيسي Electromagnetically Spinning Sphere Viscometer (EMS)	63
5.1.1.7.2 فيسكوميتر الدوراني (Rotational viscometers)	65
2.1.7.2 جهاز الرايوميتر (Rheometer)	65
الفصل الثالث: الدراسة الهيدروديناميكية لتطوير جهاز قياس لزوجة السوائل النانوية المقترح (Hydrodynamic study for the development of a proposed nanofluid viscometer)	67
1.3 تمهيد Introduction	68

2.3وصف جهاز قياس اللزوجة	68
3.3 استنتاج علاقة سرعات التدفق الداخلي والخارجي	71
4.3 استنتاج معدل تدفق السائل الداخلي والخارجي	77
1.4.3معدل تدفق السائل الداخلي	77
2.4.3معدل تدفق السائل الخارجي	79
5.3 استنتاج العلاقة التي تربط بين لزوجة السائل الداخلي ولزوجة السائل الخارجي	81
6.3 تحليل الأخطاء	84
7.3 التعديلات على تصميم الجهاز	86
الفصل الرابع: النمذجة والمحاكاة وتحليل النتائج **(Modeling, simulation and analysis of results)**	87
1.4 تمهيد (Introduction)	88
2.4 أسلوب ديناميك الموائع الحاسوبي ((Computational Fluid Dynamic (CFD)	89
1.2.4 طريقة الحجوم المحددة (FVM)	89
2.2.4 طريقة الفروق المحددة (FDM)	90
3.2.4 طريقة العناصر المحددة (FEM)	90
1.3.2.4مبدأ العناصر المحددة والخطوات الرئيسية	91
2.3.2.4أهم التطبيقات الحالية لطريقة العناصر المنتهية	92

3.3.2.4 الافاق المستقبلية المتوقعة للطريقة	92
4.2.4أسباب تطور علم ديناميك الموائع الحاسوبي	93
5.2.4المنهجية المتبعة في ديناميك الموائع الحاسوبي	93
6.2.4 مقارنة بين طرق ديناميك الموائع الحاسوبي والتجارب العملية	95
7.2.4أهداف أسلوب (CFD)	96
8.2.4 تطبيقات أسلوب (CFD)	96
9.2.4 عيوب أسلوب (CFD)	97
3.4 النمذجة والمحاكاة (Modeling and Simulation)	97
1.3.4 برنامج الماتلاب (Mathlab)	97
2.3.4برنامج سوليد ووركس (Solid Works)	98
3.3.4التحليل باستخدام برنامج (Ansys Fluent)	99
1.3.3.4 تمهيد عن تطور برنامج (Ansys Fluent)	99
2.3.3.4أهم التطبيقات الهندسية التي يتعامل معها برنامج(ANSYS)	100
3.3.3.4مراحل النمذجة باستخدام برنامج(ANSYS)	101
4.4النمذجة والمحاكاة لجهاز قياس لزوجة السوائل النانوية المقترح	102
5.4 تحليل النتائج	115
6.4 التوصيات	117

قائمة المصادر والمراجع	118

فهرس الأشكال التوضيحية

الشكل(1-1) يوضح العلاقة بين معدل القص واللزوجة الظاهرية للسائل النانوي الثاني من نوع (CNT) عند درجات حرارة مختلفة .	22
الشكل (1-2) يبين العلاقة بين معدل القص وإجهاد القص للسائل النانوي الأول من نوع (AL2O3) عند درجات الحرارة المختلفة.	23
الشكل (1-3) يبين العلاقة بين درجة الحرارة و معامل صلابة المادة وأس الجريان للسائل النانوي الأول من نوع (AL2O3) .	23
الشكل (1-4) يبين العلاقة بين درجة الحرارة واللزوجة للسائل النانوي (EG\ H2O) بنسبة (20:80%)عند تراكيز حجم مختلفة للجسيمات.	25
الشكل (1-5) يبين العلاقة بين درجة الحرارة واللزوجة للسائل النانوي (EG\H2O) بنسبة (40:60%)عند تراكيز حجم مختلفة للجسيمات.	26
الشكل (1-6) يبين العلاقة بين درجة الحرارة واللزوجة للسائل النانوي (EG\H2O) بنسبة (60:40%)عند تراكيز حجم مختلفة للجسيمات.	27
الشكل (1-7) يبين العلاقة بين اللزوجة ودرجة الحرارة للسائل النانوي (EG\H2O) بنسب مختلفة .	28

الشكل (1–8) جهاز (HAKKE MARS 2).	31
الشكل (1–9) يبين العلاقة بين معدل القص واللزوجة تحت تأثير الضغط .	32
الشكل (1–10) يوضح العلاقة بين معدل القص واللزوجة للسوائل النانوية (Zno–EG) عند تراكيز مختلفة .	33
الشكل (1–11) يوضح العلاقة بين اللزوجة ودرجة الحرارة للسوائل (Zno–EG).	34
الشكل (1–12) يبين العلاقة بين اللزوجة وقطر الجسيمات عند درجات حرارة مختلفة.	36
الشكل (1–13) العلاقة بين لزوجة السوائل النانوية وتركيز الجسيمات النانوية لمواد مختلفة	38
الشكل (2–1) يبين المسافة بين مراكز الجسيمات.	51
الشكل (2–2) يبين أجهزة قياس لزوجة السوائل العادية.	53
الشكل (2–3) يوضح مبدأ عمل فيسكوميتر أستوالد.	55
الشكل (2–4) يوضح فيسكوميتر الفقاعات.	56
الشكل(2–5) يوضح عمل فيسكوميتر الكرة الساقطة.	59
الشكل (2–6) يوضح فيسكوميتر الغزل المغناطيسي.	62
الشكل(2–7) يوضح الفيسكوميتر الدوراني.	63
الشكل (2–8) يوضح جهاز الرايوميتر.	64
الشكل (3–1) يوضح جهاز (microfluidic).	67
الشكل (3–2) يوضح المخطط الانسيابي للتجربة .	68

الشكل (3-3) يبين جهاز قياس اللزوجة وأبعاده والتدفقات .	71
الشكل (3-4) يبين خطأ القياس.	84
الشكل (4-1): الشكل التحكمي في (FVM).	87
الشكل (4-2): التقسيم والانتقال (FDM).	88
الشكل (4-3): تقسيم كرة بطريقة العناصر المحددة	88
شكل (4-4):بعض أشكال العناصر المنتهية المستوية والفراغية.	89
شكل (4-5):يوضح الخطوات المتبعة في النمذجة والمحاكاة.	100
الشكل (4-6) يبين جهاز قياس اللزوجة.	101
شكل (4-7) : الضبط العام (General).	102
شكل (4-8) : اختيار معادلة (Viscous Equation) و نموذج($k-\varepsilon$) .	103
شكل (4-9) : إدخال خواص المائع المستخدم	104
شكل (4-10) : تغير نوع المادة الجارية في الإطار الخارجي(Casing).	105
الشكل (4-11): إدخال السرعة والضغط	105
الشكل (4-12): عدد مرات الحل (50).	106
الشكل (4-13): الخطأ وعدد التكرارات(50).	107
الشكل (4-14): عدد مرات الحل (200).	107
الشكل (4-15): الخطأ وعدد التكرارات(200).	108

الشكل (4-16): نتائج المحاكاة لسائل (octanol/silicone oil).	109
الشكل (4-17): تحليل نتائج الانظمة (1,2,3,4).	114
الشكل (4-18): تحليل نتائج الانظمة (7,5,6).	114

فهرس الجداول

الجدول (4-1) يبين مقارنة بين أسلوب ديناميك الموائع الحاسوبي والتجارب العملية	93
الجدول(4-2) يبين النتائج التي تم الحصول عليها من عدد من الأنظمة.	111
الجدول(4-3) يبين النتائج التي تم الحصول عليها من عدد من الأنظمة مع القيم المحسوبة.	112

قائمة المصطلحات والاختصارات باللغتين العربية والإنكليزية

الرمز	اللغة العربية	اللغة الإنكليزية
ρ	الكثافة	Density
γ	الوزن النوعي	Specific Volume

μ	اللزوجة الديناميكية	Dynamic Viscosity
ϑ	اللزوجة الحركية	Kinematic Viscosity
R_a	نصف قطر التجميع	Assembly Radius
t_p	زمن التجميع	Collection Time
d_f	أبعاد الجسيمات	Particle Dimensions
$\emptyset$	كسر حجم الجسيمات	Particle Size Fraction
h	المسافة بين الجزيئات	Distance Between Particle
E_R	طاقة الوضع	Energy Situation
E_A	طاقة الجذبٍ	Attraction Energy
ε_r	ثابت العزل الكهربائي النسبي	Relative Dielectric Constant
ε_o	ثابت العزل الكهربائي	Dielectric Constant
ψ	الكروية	Spherical
A_h	ثابت هاماكر	Fixed Hammer

المستخلص (Abstract):

خلفية البحث:

حيث تم تطوير عمل جهاز قياس لزوجة السوائل العادية ليصبح قادر على قياس لزوجة السوائل النانوية من خلال تغير أبعاد هذا الجهاز ،و يتكون هذا الجهاز من قناة خارجية يتدفق فيها سائل ذو قيمة لزوجة معلومة وقناة داخلية يتدفق فيها سائل ذو قيمة لزوجة مجهولة(السائل النانوي) وثلاث مضخات اثنتان منها لضخ السائل في القناة الخارجية وواحدة لضخ السائل في القناة الداخلية .

هدف البحث:

إيجاد رؤية نظرية و تصميمية لإمكانية قياس لزوجة السوائل النانوية بالاستفادة من مبادئ و عمل أجهزة قياس لزوجة السوائل العادية وبحث إمكانية تطبيقها.

المواد والطرائق:

تم الاستفادة من البرامج الحاسوبية (ANsys ,Mathlap) لإجراء محاكاة حاسوبية للجهاز المقترح والتأكد من صحة النتائج المأخوذة من دراسات سابقة.

النتائج العلمية:

١. تم تطوير أبعاد الجهاز مع المحافظة على النسبة بين القطر الداخلي والقطر الخارجي ولكن تم تغير القطر الداخلي ليلائم السوائل النانوية حيث أصبحت الأبعاد الجديدة (القطر الخارجي (0.255 mm)، والقطر الداخلي (0.12 mm)).

٢. تقارب بين النتائج التجريبية والنتائج التي تم حسابها من خلال العلاقة المستنتجة والنتائج الناتجة من المحاكاة.

الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث:

١. إمكانية تصميم هذا الجهاز وحساب الإجهادات المؤثرة ، وسماكة المعدن ، والبنية.

٢. ربط الجهاز مع أجهزة قياس للسرعة والتدفقات.

٣. تطوير مجال قياس لزوجة السوائل النانوية في الجهاز.

الكلمات المفتاحية (Keywords) :

اللزوجة (Viscosity) ، السوائل النانوية(Nano fluid) ، حجم الجسيمات (Particle size) ، درجة الحرارة (Temperature). التدفق(Flow) . الضغط (Pressure).

الإطار العام للبحث

المقدمة (Introduction):

تكنولوجيا النانو (Nanotechnology) التي كثيراً ما يتردد صداها على مسامعنا في هذه الأيام ، حيث تؤدي هذه التكنولوجيا المتقدمة الدور الرئيسي الأول في النهوض الاقتصادي المبني على المعرفة ، وقد لُقبت باسم (تكنولوجيا القرن الحادي والعشرين) الذي نحن على مشارف بداية عقده الثالث . وكلمة النانو هي بادئة منحوتة من اللغة اليونانية القديمة وتعني (قزم Nanos)، وفي مجال العلوم يعني النانو جزءاً من مليار أي (جزءاً من ألف مليون)[1] .

وتوجد تكنولوجيا النانو بالفعل في الكثير من الأشياء التي من حولنا بصورة أو بأخرى حيث يتعاظم تطبيق تلك التكنولوجيا الجديدة يوماً بعد يوم . وسوف تؤتي الأبحاث العلمية الجارية حالياً وبكثافة ، في دول العالم المهتمة بعلوم وتكنولوجيا النانو ، ثمارها ، لتصبح تلك التكنولوجيا المتقدمة هي القاسم المشترك في جميع الصناعات وجزءاً مهماً لا يمكن الاستغناء عنه . ولتكنولوجيا النانو عديد من التطبيقات الواسعة في مختلف القطاعات ، مما يعني المزيد من الكفاءة والاستخدام الامثل للموارد ، مؤثرة في ذلك تأثيراً إيجابياً على مواطني المجتمعات المتقدمة من البلدان المؤمنة بدور يؤديه العلم في سبيل تحسين أوضاعها الاقتصادية والاجتماعية . أما تلك الدول المنكوبة بأمراض التخلف عن التحديث التكنولوجي ، أو تلك التي لا تتبنى خططاً قومية لتكنولوجيا النانو من الدول النامية ، فسوف تكون ضحية للتخلف في المجالات الصحية والبيئية وفي جميع المجالات الأخرى[1] .

وبالتالي سوف نقوم بعرض مراحل تطور هذه التقنية المهمة [2] :

عام (1867 م) اجرى الفيزيائي الاسكتلندي (جيمس ماكسويل) تجربة ذهنية تعرف باسم (عفريت ماكسويل) تخيل فيها مخلوقاً ذرياً يقف حارساً على بوابة ذرية تفصل بين وعائين يحتويان على غاز ويقوم بتنظيم جزيئات الغاز بوساطة منع ذرات الغاز النشطة من اجتياز البوابة والسماح للذرات الأقل

نشاطاً بعبورها ، هذه التجربة ولدت فكرة التحكم في تحريك الذرات والجزيئات وهذه الفكرة لها من التطبيقات ما يجعلها من المبادئ المميزة لتقنية النانو .

عام (1959م) تساءل الفيزيائي الامريكي (ريتشارد فاينمان) ماذا يمكن للعلماء فعله إذا استطاعوا التحكم في تحريك الذرة الواحدة وإعادة ترتيبها كما يريدون ؟ في محاضرته المعروفة (هنالك متسع في القاع) التي ألقاها أمام الجمعية الفيزيائية الامريكية ووصف فيها مجالاً جديداً يتعامل مع الذرات والجزيئات المنفردة لصنع مواد وألات دقيقة بخصائص مميزة ، فكان تساؤله وخياله العلمي بداية الإعلان عن مجال جديد عرف لاحقاً بتقنية النانو.

عام (1974م) أطلق الباحث الياباني (نوريوتا ينغوشي) تسمية مصطلح (تقنية النانو) لأول مرة للتعبير عن طرق تصنيع عناصر ميكانيكية وكهربائية متناهية في الصغر في دقة عالية .

عام (1976م) استحدث الفيزيائي الفلسطيني (منير نايفة) طرقة ليزرية تسمى (التأين الرنيني) لكشف الذرات المنفردة وقياسها بأعلى مستويات الدقة والتحكم ورصد بها ذرة واحدة بين ملايين الذرات وكشف هويتها لأول مرة في تاريخ العلم ، وتعمل طريقته على إثارة الذرات بليزر محدد اللون ، وتأينها ومن ثم تحسس الشحنات السابقة ، وبتمكنه من رصد الذرة منفردة ومعالجتها قدم الإجابة على تساؤل الفيزيائي (ريتشارد) عن إمكانية تحقيق ذلك ، وحول خياله العلمي إلى واقع حقيقي.

عام (1981 م) اخترع الباحثان السويديان (جيرد بينج وهذريك روهر) جهاز (المجهر النفقي الماسح) وحقق هذا المجهر إمكانية التعامل المباشر مع الذرات والجزيئات وتصويرها لأول مرة في التاريخ وتحريكها لتكوين جسيمات نانوية .

عام (1976م) الف (اريك وريكسلر) كتاب (محركات التكوين) وركز فيه المخاطر المتوقعة لتقنية النانو مثل صنع محركات ومركبات تسطيع نسخ نفسها ولا يمكن الحد من انتشارها ، وبسط في كتابه

الأفكار الأساسية في تقنية النانو ، ومنها إمكانية صناعة أي مادة بوساطة رص مكوناتها الذرية الواحدة تلو الاخرى .

عام (1991 م) اكتشف العالم الياباني (سوميو ليجيما) انابيب الكربون النانوية وهي عبارة عن اسطوانات من الكربون قطرها عدة نانومترات ، ولها خصائص الكترونية متميزة مما يجعلها مهمة لصناعة مواد وأدوات نانوية مدهشة .

عام (1922م) كتب الفيزيائي الفلسطيني (منير نايفة) بالذرات اصغر حرف في التاريخ (حرف p وبجانبه قلب) رمزاً على فلسطين وانتشرت في كبرى المجلات العلمية ووكالات الانباء العالمية ، والفائدة من الكتابة والرسم بالذرات أنه استطاع التحكم بتحريك الذرات بدقة وإعادة ترتيبها كما يشاء بالإضافة إلى تصويرها بشكل مكبر واستخدم في ذلك المجهر النفقي الماسح . وبهذا الانجاز والانجازات السابقة فتح الباب على مصراعيه إلى علم النانو .

وقد يكون لهذا البحث أهمية في تطوير جهاز قادر على قياس لزوجة السوائل العادية والسوائل النانوية بآنٍ واحد .

التعريفات (Definitions):

- اللزوجة (Viscosity): هي المقاومة التي يبديها السائل لتغير حالته الحركية وتختلف من سائل لأخر.
- الكثافة (Density): هي كتلة واحدة الحجوم ويرمز لها بالرمز (ρ) وتقاس بالواحدة ($\frac{kg}{m^3}$) .
- الوزن النوعي(Specific Volume) : هو وزن واحدة الحجوم ويرمز له (γ) ويقاس بالواحدة ($\frac{N}{m^3}$).
- اللزوجة الديناميكية (المطلقة) (Dynamic Viscosity) : تعبر عن مقاومة المائع للجريان .
- اللزوجة الحركية (Kinematic Viscosity): النسبة بين اللزوجة الديناميكية لسائل وكثافته.
- السوائل النانوية (Nano fluid): هي عبارة عن خلائط (صلبة– سائلة) يكون فيها حجم الجسيمات الصلبة عادة أكبر من (1nm) وأقل من (100nm) ويدعى هذا بالسلم النانوي .
- الجسيمات النانوية (Nanoparticles):هي عبارة عن جسيمات صلبة يمكن أن تكون معادن مثل (الالمنيوم(AL)–النحاس(CU)– النيكل (Ni) .... الخ) ، أو أكاسيد مثل (أوكسيد الألمنيوم (Al2O3) – أوكسيد التيتانيوم (TiO2) – أوكسيد النحاس (CuO) – أوكسيد السيليكون (SiO2) – أوكسيد الحديد الثلاثي (Fe2O3) – أوكسيد الحديد الاسود (Fe3O4)) ، أو بعض المركبات الأخرى مثل (نتريد الالمنيوم(,ALN)).
- اللزوجة الظاهرية للسوائل النانوية (Apparent Viscosity) : هي تأثير الجسيمات النانوية على لزوجة السوائل النانوية .

- الحركة البراونية (Brownian Motion): هي السرعة النسبية بين الجسيمات النانوية والسائل الاساسي .

مشكلة البحث (Research Problem):

تنحصر مشكلة البحث في صعوبة قياس لزوجة السوائل النانوية وخاصة تلك المستخدمة في الصناعات الكيميائية والصناعات الغذائية ومستحضرات التجميل ، الذي أدى إلى تعقيد في العمليات الحسابية الهيدروليكية لنقل السوائل ، وحسابات نقل الطاقة ، وتغيرات الضغط الحاصلة في الدارات التي تستخدم السوائل النانوية .

تساؤلات البحث (Questions):

الأهمية الكبيرة للسوائل النانوية واستخداماتها المتعددة تفرض علينا معرفة خصائص هذه السوائل وإحدى هذه الخصائص المهمة هي اللزوجة.

كيف يمكن معرفة قيمها والعوامل المؤثرة عليها؟

كيف يمكن التوصل إلى علاقة نستطيع من خلالها حساب لزوجة السوائل النانوية؟

كيف يمكن الحصول على جهاز يوفر لنا قياس لزوجة السوائل النانوية تحت تأثير عدد من البارامترات؟

فرضيات البحث (Research Assumes):

جهاز قياس لزوجة السوائل العادية – جهاز قياس لزوجة السوائل النانوية– السائل النانوي.

مسلمات البحث(Postulates of Research):

إمكانية تطبيق معادلة نافييه ستوكس ومعادلة الاستمرار.

خواص السوائل النانوية والعادية المستخدمة – قياس لزوجة السوائل.

تعديل جهاز قياس لزوجة السوائل العادية لقياس لزوجة السوائل النانوية.

الهدف من البحث (Aim of Research):

١. إيجاد رؤية نظرية و تصميمية لإمكانية قياس لزوجة السوائل النانوية بالاستفادة من مبادئ و عمل أجهزة قياس لزوجة السوائل العادية وبحث إمكانية تطبيقها.

٢. التأكد من صحة القيم المقاسة عن طريق إجراء المقارنات مع قيم مأخوذة من أجهزة أخرى .

٣. إجراء محاكاة حاسوبية للجهاز المقترح باستخدام برنامج (ANSYS) تتيح لنا أيضاً التأكد من صحة القيم المقاسة.

أهمية البحث (Importance of Research):

تنحصر أهمية البحث في إمكانية تطبيق نتائج هذه الدراسة على قياس لزوجة السوائل النانوية لأغلب المجالات مثل (الإلكترونيات الدقيقة ، خلايا الوقود ، محركات الطاقة الهجينة ، المجالات الطبية ...الخ) والتي تستخدم هذه السوائل .

مبررات البحث (Research Rationale):

ضرورة معرفة قيم اللزوجة للسوائل النانوية بسبب الاستخدامات الواسعة لهذه السوائل.

محدوديات البحث (Research Limitations) :

حجم الجسيمات النانوية ، تركيز حجم الجسيمات النانوية ، التدفقات ، أبعاد الجهاز.

الفصل الأول

الدراسات المرجعية

(Literature Review)

1.1 الدراسة الأولى :

(إجراء تحقيقات تجريبية للزوجة السوائل النانوية في درجات الحرارة المنخفضة)

(Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم :

(Bahadir Aladag , Salma Halelfadl , Nimeti Doner , Thierry Maré , Steven Duret , Patrice Estellé)

- نشرت بتاريخ (9 February 2012)

1.1.1 الهدف من الدراسة (Aim of the study):

كان الهدف من الدراسة دراسة تأثير درجة الحرارة وزمن القص على لزوجة السوائل النانوية (أوكسيد الالمنيوم / الماء) (AL2O3\H2O) والسوائل النانوية (أنابيب الكربون النانوية / الماء) (CNT\H2O) عند التركيز المنخفض ودرجة الحرارة المنخفضة[1] . حيث في السائل النانوي الأول (AL2O3 \H2O) السائل الأساسي هو الماء(H2O) والمادة النانوية هي جسيمات الالومينا(AL2O3) الكروية التي يبلغ قطرها (30nm) والرقم الهيدروجيني الخاص به (PH=5) و وزن الكسر النانوي (1%) والذي يعرف على أنه نسبة حجم الجسيمات النانوية ضمن حجم السائل. أما السائل النانوي الثاني (CNT\H2O) حيث السائل الأساسي هو الماء ايضاً والمادة النانوية هي عبارة عن أنابيب الكربون النانوية (CNT) حيث نسبة نقاء الكربون (90%) وأبعاد هذه الأنابيب هي الطول (L=200μm) ومتوسط القطر (d=9μm) وفقاً لمواصفات الشركة المصنعة، ونسبة

وزن الكسر النانوي (1%). حيث تم قياس الخصائص الريولوجية لكل من السوائل النانوية بوساطة رايومتر (Rheometer) خاضع للإجهاد (Malvern Kinexus pro) وهو عبارة عن صفيحتين متوازيتين تبلغ أبعادها(40mm) والفجوة بينهما (0.5mm) ويتم التحكم بالحرارة باستخدام جهاز تحكم موجود أسفل الصفحة السفلية بدقة تبلغ (0.01c°) [1].

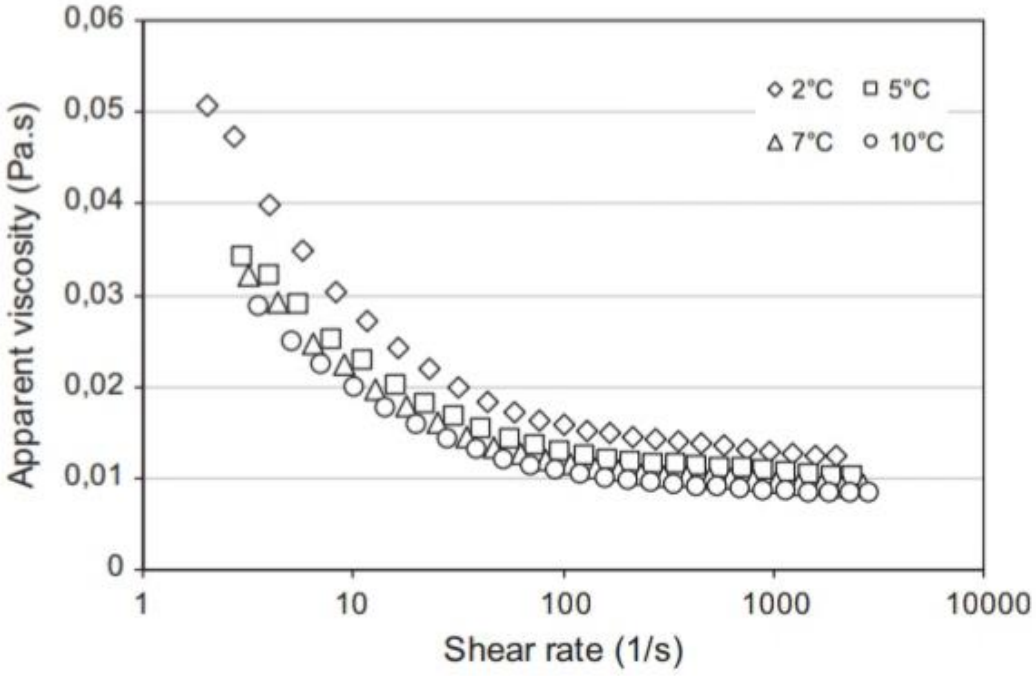
حيث يتم أخذ حجم معين من كل عينة تم اختيارها من الحاوية الخاصة بها ثم تم إعدادها على اللوحة السفلية ، ويجب الحرص على عدم وجود فقاعات هواء داخل العينة ، وبالتالي يتم فك الصفيحة العلوية لتحقيق فجوة العينة المطلوبة ويتم إزالة الفائض من العينات في نهاية المطاف . يتراوح مجال تغير الضغط بين (0.01−15 pa) للسائل النانوي الأول و (0.01−30 pa) للسائل النانوي الثاني[1] .

2.1.1نتائج الدراسة (The study results) :

تبين من خلال التجارب أن اللزوجة الظاهرية (تأثير الجسيمات النانوية على لزوجة السائل) للسائل النانوي الثاني من نوع (CNT) تقل مع ارتفاع درجة الحرارة كما هو الحال بالنسبة لفئة كبيرة من السوائل النانوية . وتبين ايضاً أن اللزوجة الظاهرية للسائل النانوي الثاني من نوع (CNT) تقل مع زيادة معدل القص. وهذا ما يبينه الشكل رقم (1−1) . وعند معدلات القص المرتفعة يمكن اعتبار أن السائل النانوي الثاني هو سائل نيوتوني وفي هذه الحالة نحصل على اللزوجة الديناميكية للسائل النانوي من العلاقة [1] :

$$\tau = \mu * \dot{Y} \qquad (1-1)$$

حيث : (τ) إجهاد القص(pa) ، (μ) اللزوجة المطلقة (pa.s) ، ($\dot{Y}$) معدل القص (1/s)



الشكل(1−1) يوضح العلاقة بين معدل القص واللزوجة الظاهرية للسائل النانوي الثاني من نوع (CNT) عند درجات حرارة مختلفة[1] .

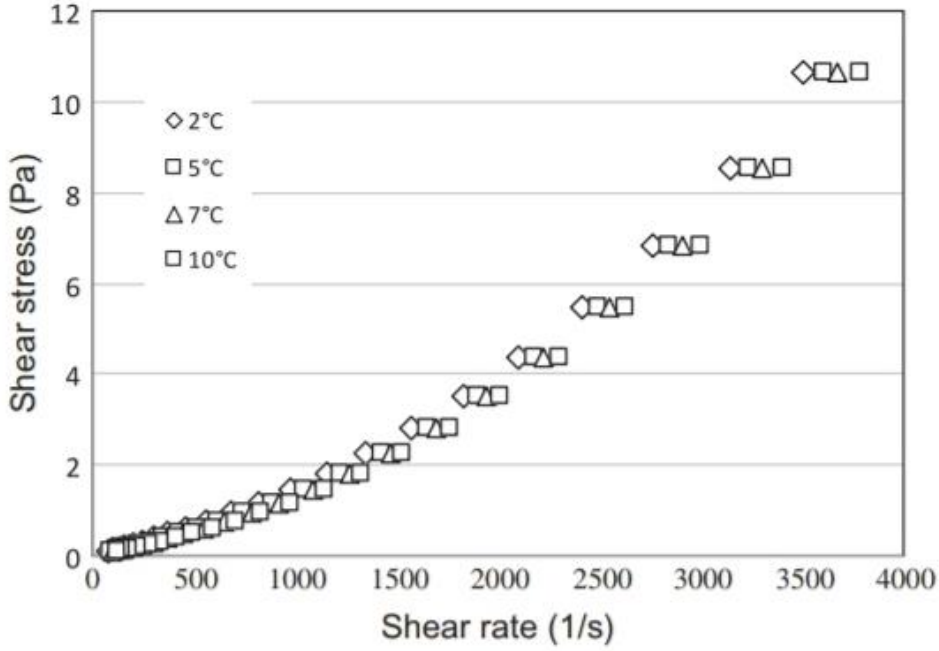
وتبين التجارب أن السائل النانوي الأول من نوع (AL2O3) يعمل على أنه سائل غير نيوتوني عند معدلات القص المرتفعة وهذا مايبينه الشكل رقم (1−2) ، حيث من خلال البيانات التجريبية يمكن الحصول على علاقة تربط بين إجهاد القص ومعدل القص[1] :

$$\tau = K \times \dot{Y}^n \qquad (2-1)$$

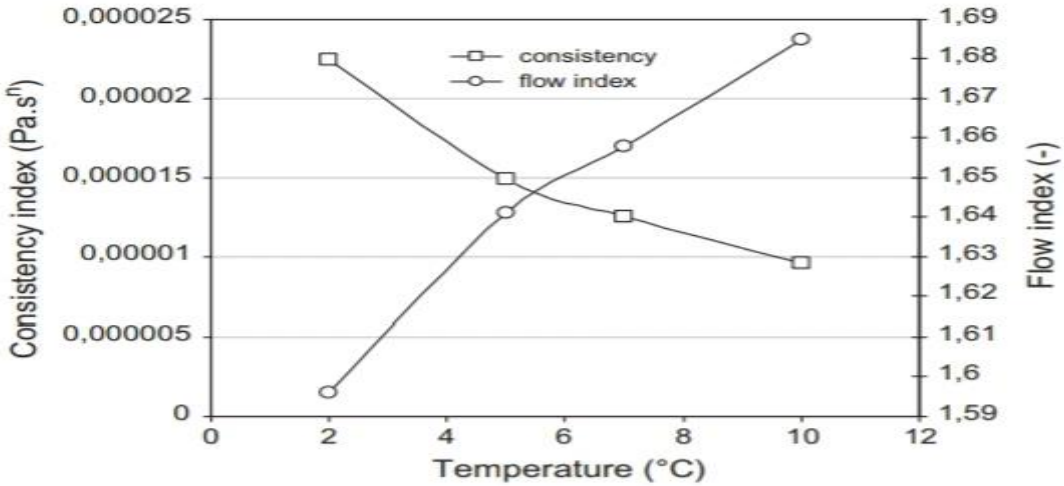
حيث : (τ) إجهاد القص(pa) ، (K) معامل صلابة المادة $(pa.\ s^n)$ ، $(\dot{Y})$ معدل القص $(1/s^n)$ ، (n) أس الجريان.

زيادة إجهاد القص تؤدي إلى انتقال الجسيمات من وضع التوازن إلى وضع الإضطراب مما يؤدي إلى تبدد المزيد من الطاقة أثناء التدفق وبالتالي يؤدي إلى زيادة لزوجة الخليط .

يبين الشكل رقم (1–3) أنه بالنسبة للسائل النانوي الأول من نوع (AL2O3) فإن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى إنخفاض معامل صلابة المادة وزيادة أس الجريان .



الشكل (1–2) يبين العلاقة بين معدل القص وإجهاد القص للسائل النانوي الأول من نوع (AL2O3) عند درجات الحرارة المختلفة[1].



الشكل (1–3) يبين العلاقة بين درجة الحرارة و معامل صلابة المادة وأس الجريان للسائل النانوي الأول من نوع (AL2O3)[1] .

2.1 الدراسة الثانية:

(إجراء تحقيقات تجريبية للزوجة السوائل النانوية غليكول الإيثلين المستقر والألومينا في الماء عند تراكيز مختلفة)

(Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al2O3 nanofluids for heat transfer applications: An experimental study)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم :

(Syam Sundar , Venkata Ramana , Manoj K. Singh , Antonio C.M. Sousa a)

- نشرت بتاريخ (14 June 2014)

1.2.1الهدف من الدراسة (Aim of the study):

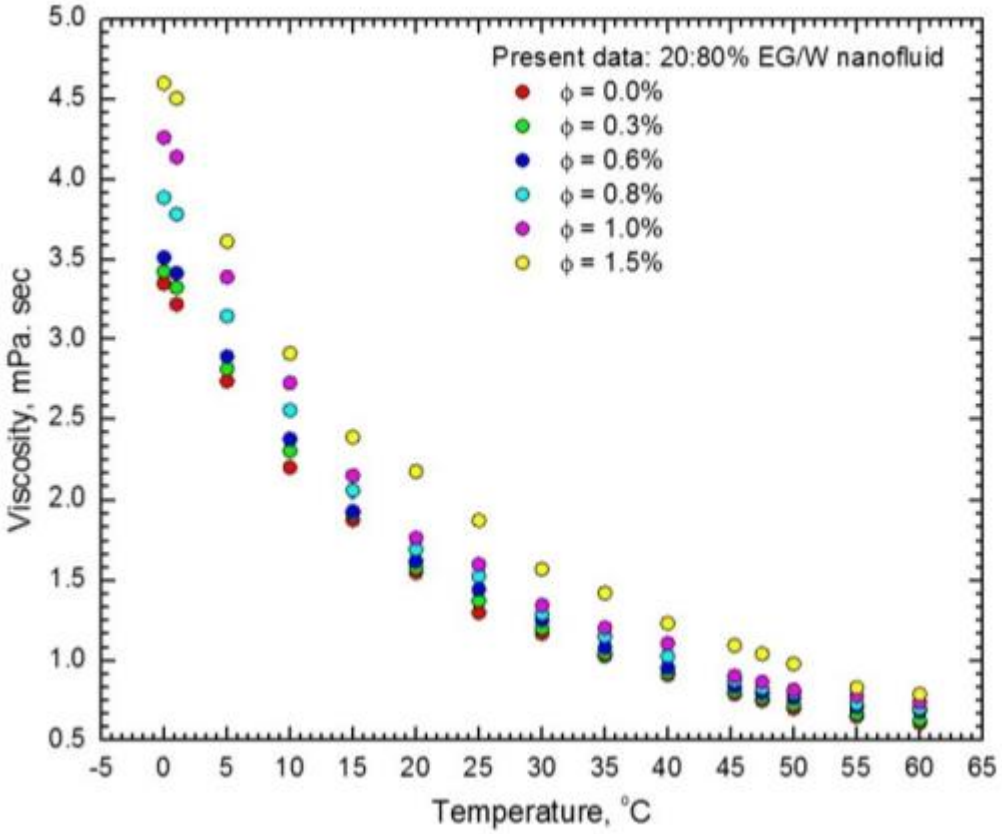
في هذه الدراسة تم استخدام الجسيمات النانوية من الألومينا (AL2O3) وغليكول الإيثلين(EG) والماء في تحضير السوائل النانوية . حيث تم تحضير السائل النانوي (EG\H2O) أي أن الماء هو السائل الأساسي والجسيمات النانوية عبارة عن غليكول الإيثلين (EG) بنسب مختلفة للوزن مثل (20:80%) ، (40:60%) ، (60:40%) ونسب تركيزات للحجم مختلفة مثل (0.3% ، 0.6%، 0.8% ، 1% ، 1.5%)[2] .

تم تقدير الكميات المطلوبة من الجسيمات النانوية بناءاً على كسر الحجم (ϕ) وهو نسبة حجم الجسيمات نسبة الى حجم السائل ، كثافة الجسيمات النانوية (3970 Kg\m^3) .

تم استخدام جهاز (Rheometer AR-1000) من أجل قياس لزوجة السوائل النانوية ، وتم استخدام هندسة اللوحة المخروطية (40mm،الزاوية 4°) . يجب أن لا تحتوي العينات على أي فقاعة هوائية في الداخل ، وتم قياس اللزوجة في درجة حرارة تتراوح بين (0°C – 60°C)[2] .

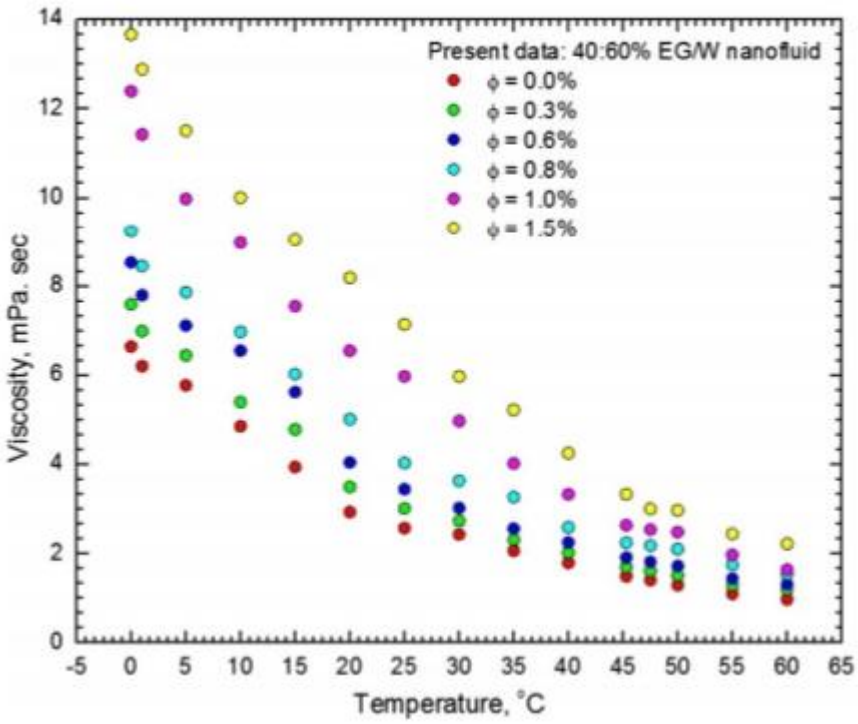
2.2.1نتائج الدراسة (The study results):

من خلال البيانات التجريبية تبين أن لزوجة السائل النانوي (EG\H2O) بنسبة (20:80%) تزداد مع زيادة تركيز حجم الجسيمات ولكنها تقل مع زيادة درجة الحرارة مقارنة بالسائل الاساسي وهذا ما تم توضيحه بالشكل رقم (1-4) [2] .



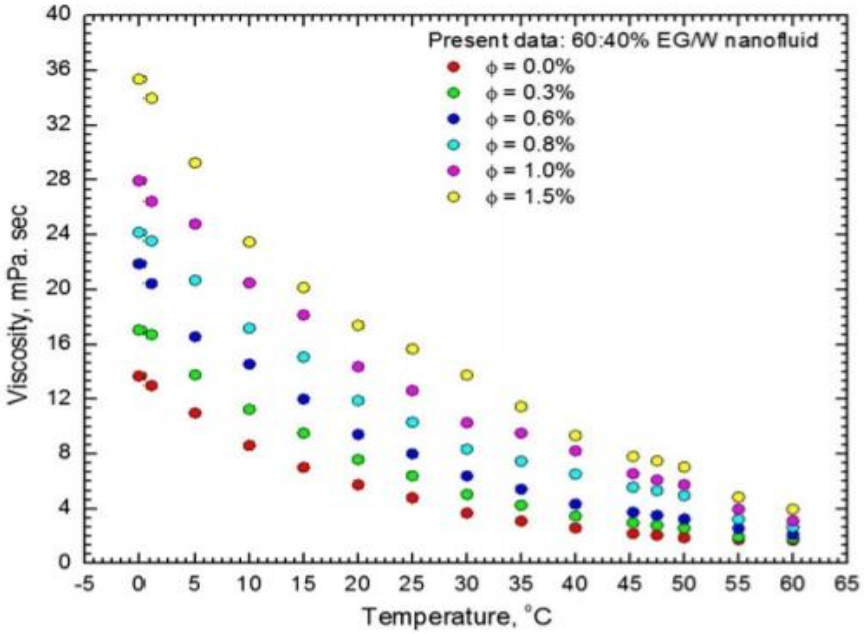
الشكل (1-4) يبين العلاقة بين درجة الحرارة واللزوجة للسائل النانوي (EG\ H2O) بنسبة (20:80%)عند تراكيز حجم مختلفة للجسيمات[2] .

من خلال البيانات التجريبية أيضاً تبين أن لزوجة السائل النانوي (EG\H2O) بنسبة (40:60%) تزداد مع زيادة تركيز حجم الجسيمات ولكنها تقل مع زيادة درجة الحرارة مقارنة بالسائل الاساسي وهذا ما تم توضيحه بالشكل رقم (1–5) [2] .



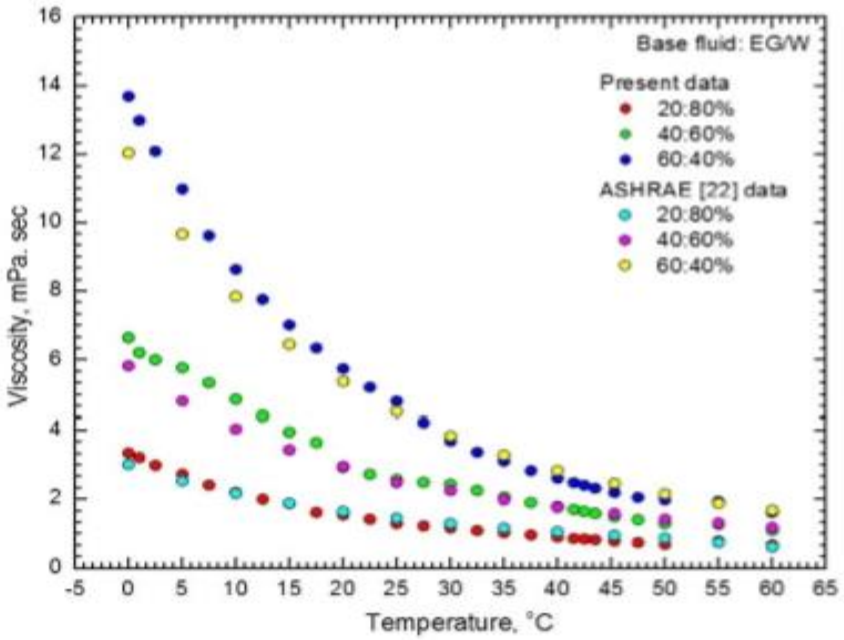
الشكل (1–5) يبين العلاقة بين درجة الحرارة واللزوجة للسائل النانوي (EG\H2O) بنسبة (40:60%)عند تراكيز حجم مختلفة للجسيمات [2] .

وكذلك بالنسبة إلى لزوجة السائل النانوي (EG\H2O) بنسبة (60:40%) تزداد مع زيادة تركيز الجسيمات وتقل بزيادة درجة الحرارة وهذا ما يبينه الشكل رقم (1–6) [2] .



الشكل (1–6) يبين العلاقة بين درجة الحرارة واللزوجة للسائل النانوي (EG\H2O) بنسبة (60:40%)عند تراكيز حجم مختلفة للجسيمات[2] .

ووفقاً لدليل (ASHRAE) تبين أن لزوجة السائل النانوي(EG\H2O) بنسبة (60:40%)(أي ان الجسيمات النانوية تشغل وزن (60%)) أكثر من لزوجة السائل نفسه بنسبة (40:60%) (أي بانخفاض نسبة وزن الجسيمات النانوية(40%)) و (20:80%) من السوائل الأخرى ، لذلك السوائل الأساسية عالية اللزوجة عند إضافة الجسيمات النانوية لها تكون لزوجتها أعلى من السوائل الأساسية منخفضة اللزوجة عند إضافة الجسيمات النانوية لها [2] ، وهذا ما يبينه الشكل (1–7) .



الشكل (1−7) يبين العلاقة بين اللزوجة ودرجة الحرارة للسائل النانوي (EG\H2O) بنسب مختلفة .

اقترح الباحثون علاقة لحساب لزوجة السوائل النانوية تربط بين اللزوجة وتركيز حجم الجسيمات ودرجة الحرارة ، قام الباحث (Namburu et al) بإعداد سائل نانوي من (AL2O3) بنسبة (60:40%) من (EG\H2O) وقياس اللزوجة في درجة حرارة تتراوح بين(35°C,50°C−) وتركيز حجم الجسيمات يتراوح بين (10% , 1%) وتم اقتراح العلاقة المتبادلة التالية [2] :

$$\log(\mu_{bf}) = A * e^{-BT} \qquad (3-1)$$

حيث:

(μ_{bf}) : لزوجة السائل الاساسي$(pa.s)$.

(T) : درجة الحرارة (°C).

ϕ :نسبة حجم الجسيمات النانوية.

A,B ثوابت قيمها تتعلق بنسبة حجم الجسيمات النانوية :

$A=-0.29956\phi^3+6.7388\phi^2-55.444\phi+236.11$

$B=(-6.4745\phi^3+140.03\phi^2-1478.5\phi+20341)\backslash 10^6$

وقام(Yamsawas et al) بتطوير علاقة للتنبؤ بلزوجة (TiO2) و (AL2O3) في خليط من (EG\H2O) بنسبة (20:80%):

$$\mu_{bf}=A*\phi^B*T^C*\mu_{nf}^D \qquad (4-1)$$

حيث (A,B,C,D) ثوابت قيمها تبعا لنوع السائل:

A=0.837931,B=0.188264,C=0.089069,D=1.100945 (TiO2)

A=0.891942,B=0.739192,C=0.099205,D=1.9844 (AL2O3)

(μ_{nf}) : لزوجة السائل النانوي ($pa.s$) .

(μ_{bf}) : لزوجة السائل اساسي($pa.s$).

3.1 الدراسة الثالثة :

(تأثير خواص الضغط على اللزوجة للسوائل النانوية مثل ثنائي إيثلين الغليكول القائمة على أساس MgAL2O4)

(Influence of pressure on viscosityof diethylene glycol–based MgAl2O4 nanofluids)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم :

(Gaweł Zyła , Joanna Grzywa, Adam Witek , Marian Cholewa)

- نشرت بتاريخ (2014)

1.3.1الهدف من الدراسة (Aim of the study):

قياس اللزوجة الديناميكية للسوائل النانوية ذات التراكيز المختلفة للجسيمات النانوية في نطاق معدلات القص من ($10-1000s^{-1}$) في درجة الحرارة الثابتة تحت ضغط (7.5Mpa)[3] .

تم إجراء القياسات التي تصف تأثير الضغط على لزوجة السوائل النانوية (MgAL2O4–EG) (الومينات المغنزيوم– غليكول الايثلين) باستخدام جهاز (HAKKE MARS 2) الذي يوضحه الشكل (1–8) ، ويمكن استخدامه لإجراء قياسات دوارة ، ويتيح هذا المقياس تنظيم عزم الدوران (50nNm–200mNm) وكذلك التحكم في السرعة الزاوية (10^{-5}–1500 rpm) [3] .

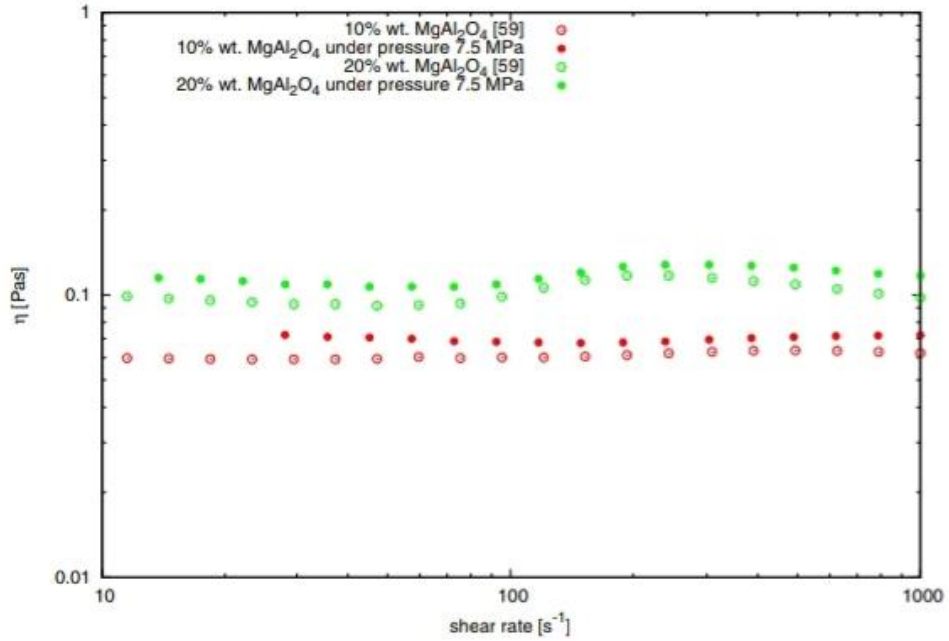
الشكل (1−8) جهاز (HAKKE MARS 2)[3] .

حيث (A) مضخة يدوية ، (B) صمام يصل بين المضخة والغرفة ، (C) مقياس ضغط ، (D) أنابيب، (E) مغناطيس خارجي .

2.3.1نتائج الدراسة (The study results):

على الرغم من انخفاض درجة لزوجة السائل مع زيادة الحرارة إلا أنه تزداد بشكل عام مع زيادة الضغط ، فالضغط الذي يمارس على السائل يسبب اقتراب الجسيمات من بعضها البعض وزيادة التفاعلات بين الجسيمات ولذلك ترتفع درجة لزوجة السائل النانوي . وهذا ما يبينه الشكل رقم (1−9).

وبالتالي تعتمد زيادة لزوجة السائل مع الضغط على نوع السائل ، في حالة زيوت التشحيم قد تزيد اللزوجة تحت ضغط (1000Mpa) حتى (107) مرة مقارنة باللزوجة تحت ضغط الغلاف الجوي [3]



الشكل (1–9) يبين العلاقة بين معدل القص واللزوجة تحت تأثير الضغط [3] .

4.1الدراسة الرابعة :

(إجراء تحقيقات تجريبية للزوجة السوائل النانوية Zno القائمة على اساس إيثلين غليكول EG)

(Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم :

(Haoran Li, Li Wang, Yurong He, Yanwei Hu, Jiaqi Zhu, Baocheng Jiang)

- نشرت بتاريخ (20 October 2014)

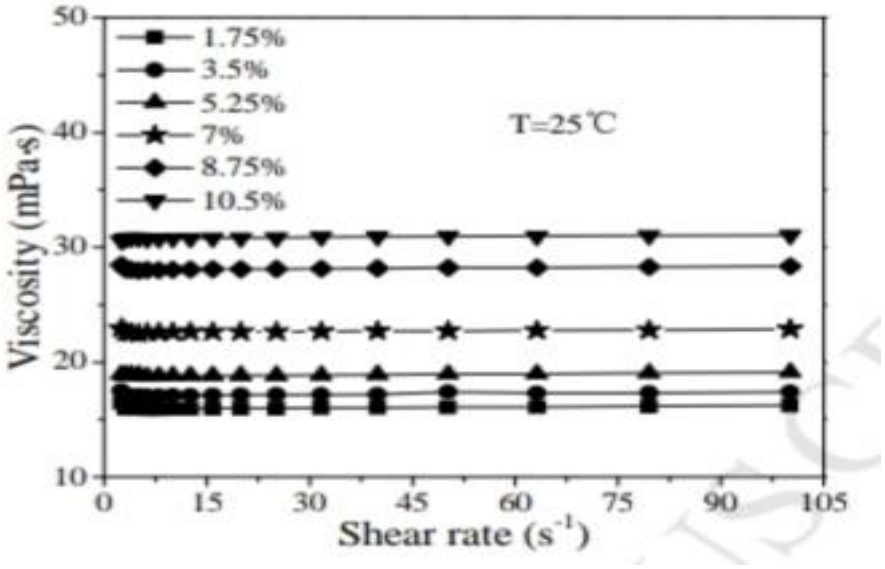
1.4.1الهدف من الدراسة (Aim of the study):

إعداد سوائل نانوية قائمة على اساس (EG) (غليكول الايتلين) والتي تحتوي على جسيمات نانوية من (Zno) (اوكسيد الزنك) بقطر متوسط (30nm) ، وكثافة ($5.6\ g/cm^3$) ، والنقاء (99.9%) مع كسور كتلة(نسبة وزن الجسيمات النانوية من وزن السائل) مختلفة تتراوح بين (1.75%−10.5%) ، وقياس اللزوجة تجريبياً لهذه السوائل[4] .

القيام بفحص تأثير تركيز الجسيمات ودرجة الحرارة على لزوجة السوائل النانوية .

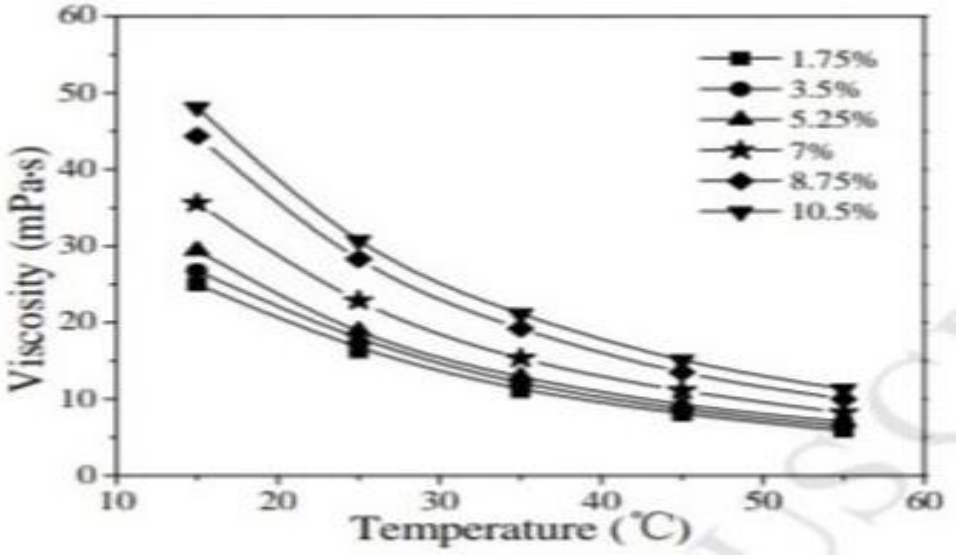
2.4.1نتائج الدراسة (The study results):

توضح السلوكيات الريولوجية للسوائل النانوية أن سوائل (Zno−EG) في حالة تركيز الوزن أقل من (10.5%) تبدي سلوك نيوتوني وعندما تزداد اللزوجة بزيادة التركيز قد يتغير السلوك إلى سلوك غير نيوتوني وهذا ما يبينه الشكل رقم(1−10). وهذه السلوكيات للسوائل النانوية تعتمد على العديد من العوامل مثل نوع الجسيمات النانوية وشكلها وكسر حجمها ودرجة حرارتها[4] .



الشكل (1−10) يوضح العلاقة بين معدل القص واللزوجة للسوائل النانوية (Zno−EG) عند تراكيز مختلفة[4] .

وايضاً تم قياس تغير لزوجة السائل النانوي تبعا لتغير درجة الحرارة ، حيث الشكل رقم (1-11) يظهر تغير اللزوجة التجريبية تبعا لتغير درجة الحرارة في المجال (15°C-55°C) والتركيز في المجال (1.75%-10.5%) ، حيث تبين أن اللزوجة تقل مع زيادة درجة الحرارة وتزداد مع زيادة كسر الكتلة(نسبة وزن الجسيمات النانوية من وزن السائل الاساسي) [4] .



الشكل (1-11) يوضح العلاقة بين اللزوجة ودرجة الحرارة للسوائل (Zno-EG)[5] .

5.1الدراسة الخامسة :

(تأثير حجم الجسيمات على لزوجة السوائل النانوية)

(Effect of particle size on the viscosity of nanofluids)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم :

(Halil Dogacan Kocaa , Serkan Doganayb , Alpaslan Turgutc , Ismail Hakki Tavmanc , R. Saidur d,e , Islam Mohammed Mahbubulf)

- نشرت بتاريخ (2014)

1.5.1الهدف من الدراسة:

إن الانظمة القائمة على السوائل النانوية لها نطاق واسع (مجمعات الطاقة الشمسية ، تبريد الإلكترونيات ، السيارات ، تبريد المفاعل النووي ، الثلاجات ، المبادلات الحرارية)[10] .

فمن الضروري إجراء تحقيق دقيق في الخصائص الحرارية وإحدى الدراسات الرائدة في التوصيل الحراري

تبين أن وجود الجسيمات النانوية في السائل تعطي موصلية حرارية أكبر من نفس السائل بدون جسيمات نانوية. على الرغم من أن الهدف من إضافة جزيئات بحجم النانو إلى سائل أساسي هو للوصول الى قيم توصيل حراري أفضل ، فإن الموصلية الحرارية ليست هي الخاصية الوحيدة التي تؤثر على انتقال الحرارة. تقوم اللزوجة أيضًا بدورٍ رئيسي في توصيف سلوك نقل الحرارة للسائل النانوي.

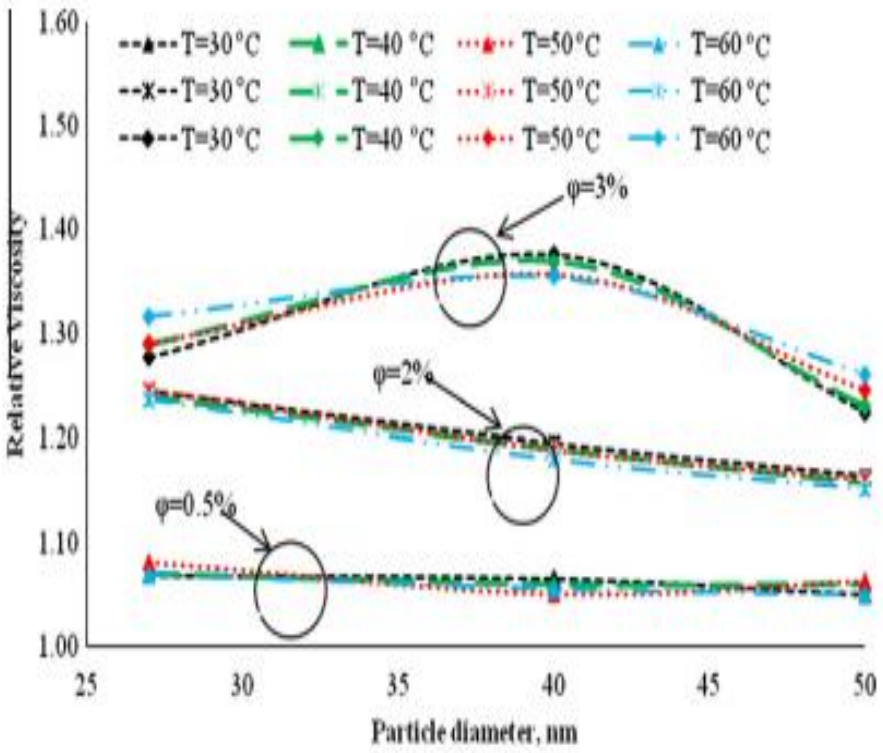
ومن المجموعات التي بحثت في خصائص السوائل النانوية وتبين أن اللزوجة لم تتأثر فقط بتركيز حجم الجسيمات ، ولكن ايضا بحجم هذه الجسيمات [10] .

دراسة تجريبية على السوائل النانوية في الماء مع ثلاثة من الجسيمات النانوية بأقطار مختلفة *(*37 و 71و 98 نانومتر).تم إعداد (*14*) من العينات عن طريق تشتيت الجسيمات النانوية في الماء باستخدام هزاز فوق صوتي لمدة (120) دقيقة . . قاموا بقياس اللزوجة نسبة (الحديد– الماء) تحت تأثير الظروف المحيطة لستة أحجام مختلفة التركيزات تراوحت من(0.0313 إلى 1٪) [10] .

2.5.1نتائج الدراسة:

تم قياس تأثير حجم الجسيمات على لزوجة Al2O3 – الكيروسين النانوي . تم قياس لزوجة السوائل النانوية بين (25–65) درجة مئوية باستخدام مقياس اللزوجة الرقمي Brookfield LVDV–II مع مغزل من النوع المخروطي .كما تمت إضافة خافض للتوتر السطحي بتركيز (0.03%) بالحجم إلى السوائل النانوية للوقاية من تكتل الجسيمات مع وقت مختلف بالموجات فوق صوتية (*30*) دقيقة من 0.05% إلى 3 ساعات لحجم 1%) .لاحظوا أن الزيادة في اللزوجة لأصغر حجم أكبر مقارنة بالجزيئات الاكبر[10] .

حيث يبين الشكل (1–12) العلاقة بين اللزوجة وقطر الجسيمات عند درجات حرارة مختلفة .



الشكل (1–12) يبين العلاقة بين اللزوجة وقطر الجسيمات عند درجات حرارة مختلفة.

6.1الدراسة السادسة :

(تأثير تركيز الجسيمات والمواد على لزوجة السوائل النانوية)

(Dependence of Nanofluid Viscosity on Nanoparticle Size and Material)

- قام بهذه الدراسة عدد من الباحثين هم :

(Valery Ya. RUDYAK , Sergey L. KRASNOLUTSKII, Denis A. IVANOV)

- نشرت بتاريخ (10 September 2014)

1.6.1الهدف من الدراسة:

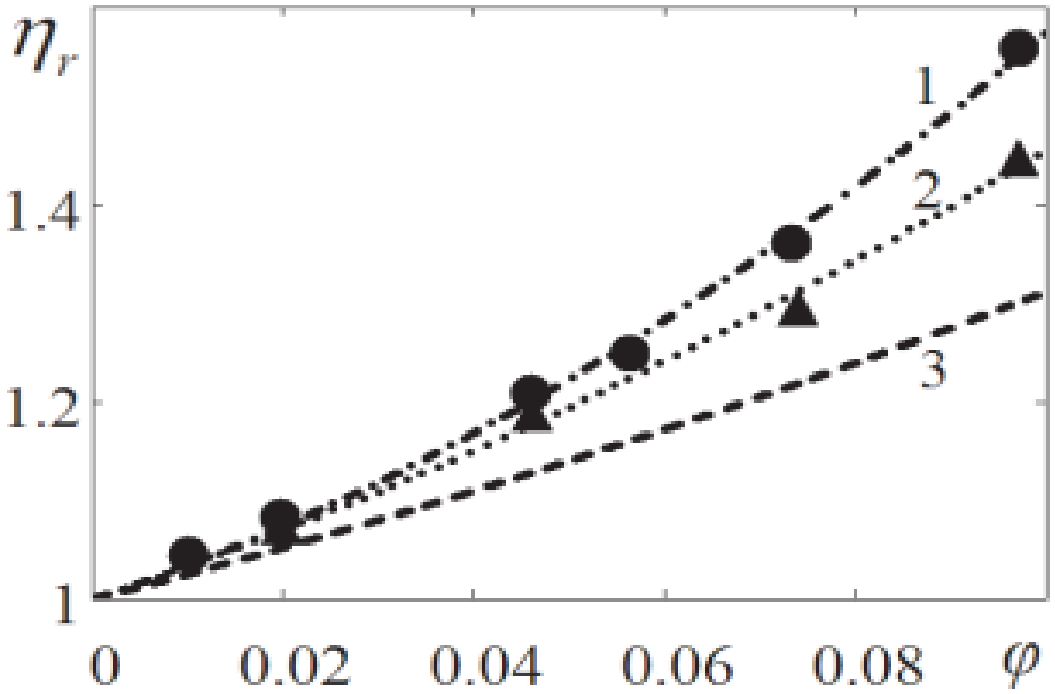
دراسة لزوجة السوائل النانوية النموذجية حيث كان السائل الحامل عبارة عن الارغون بكثافة (0.707) ودرجة الحرارة (300K) والجسيم النانوي هو الليثيوم وجسيمات الالمنيوم النانوية التي يبلغ قطرها (من 1 الى 4 نانومتر). تركيز الجسيمات النانوية (من 1% الى 12%)[11] .

2.6.1 نتائج الدراسة:

تشير النتائج إلى أن اللزوجة الفعالة للسوائل النانوية تزداد مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية . في حين أن لزوجة السوائل النانوية تتناقص مع زيادة حجم الجسيمات [11] .

ويلاحظ أن لزوجة السوائل النانوية تعتمد على مادة الجسيمات النانوية عندما يكون حجم الجسيمات النانوية صغير ، وهذه الخاصية يتم اهمالها عندما يزداد حجم الجسيمات النانوية أكثر من (10) نانومتر. كما يبين الشكل (1-13) العلاقة بين لزوجة السوائل النانوية وتركيز الجسيمات النانوية لمواد

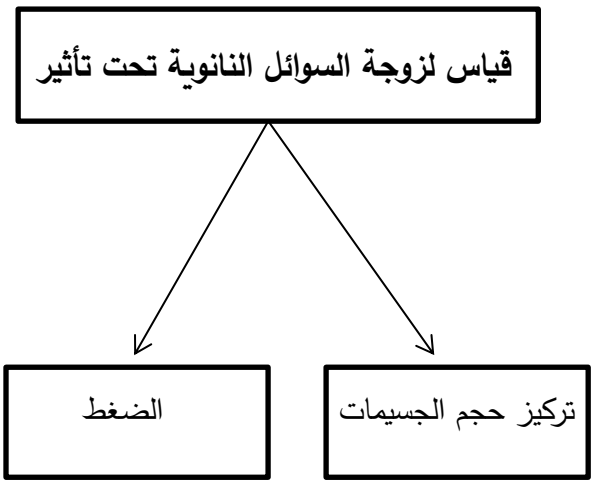
مختلفة حيث يمثل الخط البياني (1) العلاقة مع وجود جسيمات الليثيوم النانوية ، والخط البياني (2) العلاقة مع وجود جسيمات الالمنيوم النانوية ، والخط البياني (3) يمثل القيم التي تم الحصول عليها بالاعتماد على نظرية باتشيلور الذي أخذ بعين الاعتبار تشتت الجسيمات والحركة البراونية [11] .



الشكل (1–13) العلاقة بين لزوجة السوائل النانوية وتركيز الجسيمات النانوية لمواد مختلفة.

7.1الخلاصة من الدراسات السابقة :

8.1 في بحثنا سوف نقوم بدراسة :



الفصل الثاني

مبادئ عمل أجهزة قياس لزوجة السوائل النانوية والعادية

(Working principles of viscometers for nanofluids and liquids)

1.2 تمهيد Introduction:

من بين الخصائص الفيزيائية الأساسية للسوائل والضرورية للتصميم والعمليات الصناعية ، يجدر بنا ذكر اللزوجة باعتبارها مهمة جداً في الصناعات الكيميائية والصناعات الغذائية ومستحضرات التجميل . إن معرفة قيم اللزوجة ضرورية لإجراء العمليات الحسابية الهيدروليكية لنقل السوائل وحسابات نقل الطاقة . وتعرف اللزوجة :بانها المقاومة التي يبديها السائل لتغير حالته الحركية . وكلما ازدادت لزوجة سائل ما كلما قلت قابليته للجريان ، فالعسل عالي اللزوجة والماء منخفض اللزوجة . تنشئ اللزوجة من قوى الاحتكاك بين طبقات السائل في أثناء حركتها (بسبب وجود قوى تجاذب بين جزيئات السائل تسبب احتكاكاً داخلياً). ويكون هذا التأثير ضعيفاً في المحاليل ذات اللزوجة المنخفضة كالكحول الإيثيلي والماء ذات الانسياب السريع ، والمحاليل الأخرى مثل عسل النحل وزيوت المحركات ذات اللزوجة العالية يكون انسيابها بطيئاً إلى حد كبير. كذلك يمكن القول بأن احتكاك الطبقات المتجاورة في الغليسرين أكبر من احتكاك الطبقات المتجاورة في الماء ، ولهذا تقل سرعة الغليسرين عن سرعة جريان الماء ويصبح الغليسرين أكثر لزوجة من الماء .

وإذا فرضنا أننا وضعا سائلاً في أنبوبة ضيقة وأثرنا عليه بقوة ما مثل فرق في الضغط بين طرفي الأنبوبة ، فإن السائل يبدأ في الجريان في الأنبوبة ولكن السرعة التي تتحرك فيها طبقات هذا السائل تختلف من طبقة إلى أخرى ، فالطبقة الرقيقة الملامسة لجدار الأنبوبة تكون ساكنة تقريباً ، وتتزايد سرعة حركة الطبقات كلما ابتعدنا عن جدار الأنبوبة ، وتصل هذه السرعة إلى أقصاها في الطبقات الوسطى من السائل ، ثم تقل بعد ذلك تدريجياً حتى تصل إلى جدار الأنبوبة .

تعتبر سوائل النانو مادة مبتكرة ، وهي عبارة عن خلائط (صلبة – سائلة) يكون فيها حجم الجسيمات الصلبة عادة أكبر من (1nm) وأقل من (100nm) ويدعى هذا المجال بالسلم النانوي ، ويمكن أن تكون هذه الجسيمات الصلبة هي جسيمات معدنية مثل (AL–Cu–Ni) (الالمنيوم – النحاس –

النيكل) ، أو أكاسيد مثل ($AL2O3-TiO2-Cuo-SiO2-Fe2O3-Fe3O4$) (اوكسيد الالمنيوم – اوكسيد التيتانيوم – اوكسيد النحاس – اوكسيد السيليكون – اوكسيد الحديد – اوكسيد الحديدي) ، أو بعض المواد المركبة الأخرى مثل ($ALN-Sic-graphene$).

والسوائل النانوية هي جيل جديد من سوائل نقل الحرارة التي يتم تحسينها بإضافة الجسيمات النانوية في السوائل الأصلية (سوائل نقل الحرارة التقليدية) .

وقبل تصميم أي نظام حراري يكون فيه السائل النانوي هو السائل العامل من الضروري معرفة الخصائص الفيزيائية الحرارية للسائل النانوي بما في ذلك التوصيل الحراري واللزوجة والسعة الحرارية والكثافة . ومن بين هذه الخصائص تعد اللزوجة خاصة مهمة جداً نظراً لأنها تشير إلى مقاومة السائل ، ومع زيادة اللزوجة تزداد الطاقة المطلوبة للضخ والخلط .

إن الخواص المتعددة للجزيئات النانوية مثل المغناطيسية ، والضوئية ، والحرارة ، وخصائص النقل ، جذبت اهتمام المجتمعات العلمية عبر نطاق واسع ، ومن الخواص الهامة التي تمت دراستها بشكل واسع وعلى مدى السنوات العشرين الماضية هي خاصة التوصيل الحراري .

لأن إضافة الجسيمات النانوية التي تكون غالباً أقل من (1%) من الحجم إلى سائل نقل الحرارة الشائع تمكن من زيادة التوصيل الحراري لنفس السائل بنسبة تصل إلى (40%) أو أكثر ، وتميل هذه الجسيمات إلى تكوين تجمعات تؤدي في النهاية إلى الفصل والاستقرار .

بداية يجب معرفة تركيز الجسيمات في السائل النانوي ، ثم تحديد الوقت اللازم للتجميع ، والوقت اللازم للاستقرار .

2.2 مفهوم نموذج التجميع (Aggregation Model):

هو نظام تكون فيه الجسيمات النانوية مشتتة بشكل جيد في السائل ، ثم تبدأ التجمعات في التكوين وتستغرق زمن معين يدعى زمن التجميع (t_p) ويتعلق بعدد من البارامترات مثل كسر حجم الجسيمات النانوية(Ø) (نسبة حجم الجسيمات النانوية الى حجم السائل) ، وتركيزها ، ودرجة حرارة المحلول(T) ، ونسبة الثبات(W) ، وقطر الجسيمات(d_f)، ويتسم هذا التجميع بنصف قطر (R_a) . ولدينا العلاقة التي تربط بين نصف قطر التجميع (R_a) وزمن التجميع (t_p) خلال فترة زمنية معينة (t)[9] :

$$\frac{R_a}{r_p} = (1 + \frac{t}{t_p})^{\frac{1}{d_f}} \qquad (1-2)$$

حيث : (R_a) نصف قطر التجميع(nm) .

(r_p) نصف قطر ديباي(nm) .

(t_p) زمن التجميع(s)

(d_f) أبعاد الجسيمات (nm) وتؤخذ بين $(1.75-2.5)$

ويتم حساب زمن التجميع من العلاقة [9] :

$$t_p = \frac{\pi * \mu * {r_p}^3 * W}{k_p * T * \emptyset} \qquad (2-2)$$

حيث : (k_p) ثابت بولتزمان ($5.67*10^{-8}\ j*m^{-2}*s^{-1}*K^{-4}$) .

(T) درجة الحرارة (K) .

(Ø) كسر حجم الجسيمات (مقدار نسبي ليس له واحدة) .

(μ) لزوجة السائل (pa.s) .

(W) نسبة الاستقرار وتتحدد قيمتها بالعلاقة [9] :

$$W = 2 * r_p * \int_0^{\infty} (B(h) * e^{\frac{\frac{E_R+E_A}{k_B*T}}{(h+2*r)^2}}) * dh \qquad (3-2)$$

حيث : B(h) العامل الذي يحتسب التفاعل الهيدروديناميكي .

(h) المسافة بين الجزيئات .

(E_R) طاقة الوضع الحراري .

(E_A) طاقة الجذب المحتملة .

وتتحدد قيمة المعامل ((B(h)) بالعلاقة [9] :

$$B(h) = \frac{6 * \left(\frac{h}{r_p}\right)^2 + 13 * (\frac{h}{r_p}) + 2}{6 * (h + r_p)^2 + 4 * (\frac{h}{r_p})} \qquad (4-2)$$

أما طاقة الوضع الحراري (E_R) تحسب بالعلاقة [9] :

$$E_R = 2 * \pi * \varepsilon_r * \varepsilon_\circ * r_p * \psi^2 * e^{(-Ah)} \qquad (5-2)$$

حيث: (ε_r) ثابت العزل الكهربائي النسبي للسائل.

$(\varepsilon_\circ)$ ثابت العزل الكهربائي .

(ψ) الكروية (ليس لها واحدة).

(Ah) ثابت هاماكر.

ويتم ايجاد معامل الكروية (ψ) من العلاقة [9] :

$$\psi = \frac{Fs}{Fp} \qquad (6-2)$$

حيث: (Fs) مساحة سطح الشكل الكروي.

(Fp) مساحة سطح التجميع التي لها نفس حجم السطح الكروي.

أما طاقة الجذب(E_A) تحسب من العلاقة [9] :

$$E_A = -\frac{A}{6*\left(\frac{2*{r_p}^2}{h(h+4r_p)}+\frac{2*{r_p}^2}{(h+2r_p)^2}+\ln\left(\frac{h(h+4*r_p)}{(h+2r_p)^2}\right)\right)} \qquad (7-2)$$

3.2 مفهوم كثافة التجميع(Aggregation Density) :

الجسيمات النانوية المجتمعة معاً عندما ينخفض البعد الكسري ($d_f = 1.8$) يقترب الشكل من جسم مسطح ثنائي البعد محاط بطبقة رقيقة من جزيئات السائل . ونظراً للكثافة الكبيرة للجسم الصلب يمكن اعتبار أن كثافة التجميع مساوية إلى كثافة الجسم الصلب [9] .

4.2 كثافة المحلول المتجانس(Density of ahomogeneous solution):

إذا كانت التجمعات موزعة بالتساوي على كامل السائل يصبح هذا التدفق متجانساً للتجمعات .

أما كثافة الخليط (سائل / صلب) يتحدد بالعلاقة [9] :

$$\rho_m = \emptyset_p * \rho_a * (\frac{R_a}{r})^{(3-d_f)} + \left(1-\emptyset_p * (\frac{R_a}{r})^{(3-d_f)}\right) * \rho_f \qquad (8-2)$$

حيث : (ρ_m) كثافة الخليط ($\frac{Kg}{m^3}$).

(ρ_a) كثافة الجزيئات الصلبة $(\frac{Kg}{m^3})$.

(ρ_f) كثافة السائل $(\frac{Kg}{m^3})$.

5.2 النماذج الاساسية لحساب لزوجة السائل النانوي :

يتم حساب لزوجة السائل النانوي عن طريق التفكير في الحركة البراونية للجسيمات النانوية وقد أخذت بالاعتبار السرعة النسبية بين السائل الاساسي والسائل النانوي[9] .

وتتعلق لزوجة السائل النانوي بعدد من العوامل أهمها: (درجة الحرارة – متوسط القطر النانوي – كسر حجم الجسيمات النانوية – الكثافة النانوية – الخصائص المادية للسائل الاساسي) [9].

1.5.2 نموذج أينشتاين (Einstein Model):

قدم أينشتاين(Einstein) نموذج بسيط لحساب لزوجة السوائل النانوية ذات التركيز المنخفض للجسيمات الكروية($\emptyset \cong 0.02$)[9] :

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5 * \emptyset \qquad (9-2)$$

حيث: (μ_r) اللزوجة النسبية .

(μ_{nf}) لزوجة السائل النانوي $(pa.s)$.

(μ_{bf}) لزوجة السائل الاساسي $(\mathrm{pa.s})$.

$(\emptyset)$ كسر حجم الجسيمات .

2.5.2 نموذج برينكمان(Brinkman Model):

ثم جاء برينكمان (Brinkman) وعمم علاقة (Einstein) للسوائل ذات التراكيز الأعلى [9] :

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\emptyset)^{2.5}} \qquad (10-2)$$

حيث: (μ_r) اللزوجة النسبية (ليس لها واحدة) .

(μ_{nf}) لزوجة السائل النانوي $(pa.s)$.

(μ_{bf}) لزوجة السائل الاساسي $(\mathrm{pa.s})$.

$(\emptyset)$ كسر حجم الجسيمات .

2.5. 3 نموذج فرانكل واكريفوس(Frankel Wakrevos Model):

اقترح العلاقة المتبادلة التالية [9] :

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{9}{8}\left(\frac{(\frac{\emptyset}{\emptyset_m})^{\frac{1}{3}}}{1-(\frac{\emptyset}{\emptyset_m})^{\frac{1}{3}}}\right) \qquad (11-2)$$

حيث: (μ_r) اللزوجة النسبية (ليس لها واحدة) .

(μ_{nf}) لزوجة السائل النانوي $(pa.s)$.

(μ_{bf}) لزوجة السائل الاساسي $(\mathrm{pa.s})$.

$(\emptyset)$ كسر حجم الجسيمات .

5.2. 4 نموذج باتشيلور(Bachelor Model):

أخذ بالاعتبار تأثير الحركة البراونية للجسيمات الصلبة والكروية وطور العلاقة المتبادلة التالية [9] :

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\emptyset + 6.5\emptyset^2 \qquad (12-2)$$

حيث: (μ_r) اللزوجة النسبية(ليس لها واحدة) .

(μ_{nf}) لزوجة السائل النانوي $(pa.s)$.

(μ_{bf}) لزوجة السائل الاساسي $(\mathrm{pa.s})$.

$(\emptyset)$ كسر حجم الجسيمات .

5.5.2 نموذج غراهام(Graham's Model):

عمم عمل فرانكل واكريفوس وتم تقديم العلاقة المتبادلة لتركيزات منخفضة [9] :

$$\mu_r = \frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = 1 + 2.5\emptyset + 4.5\left(\frac{1}{\left(\frac{h}{dp}\right).\left(2+\frac{h}{dp}\right).\left(1+\frac{h}{dp}\right)^2}\right) \qquad (13-2)$$

6.2 اللزوجة الفعلية للسوائل النانوية(Actual Viscosity):

تأثيرات الجسيمات النانوية على لزوجة السوائل النانوية يتم إدخالها بما يسمى باللزوجة الظاهرية التي نعبر عنها بالرمز (μ_{app}) ولذلك تعرف اللزوجة الفعلية على النحو التالي [9] :

$$\mu_{nf} = \mu_{app} + \mu_{bf} \qquad (14-2)$$

حيث: (μ_{nf}) لزوجة السائل النانوي $(pa.s)$.

(μ_{bf}) لزوجة السائل الاساسي (pa.s).

(μ_{app}) اللزوجة الظاهرية (pa.s).

الحركة البراونية هي بارامتر مهم يخلق سرعة نسبية بين الجسيم النانوي والسائل الاساسي في السوائل النانوية، حيث يتم تعريف السرعة البراونية ورقم رينولدز المقابل لها بالعلاقات التالية [9] :

$$V_b = \frac{1}{dp}.\sqrt{\frac{18k_p.T}{\pi.\rho_p.dp}} \qquad (15-2)$$

حيث : (ρ_p) :الكثافة $(\frac{kg}{m^3})$.

(k_p) : ثابت بولتزمان $(5.67*10^{-8}\ j*m^{-2}*s^{-1}*K^{-4})$.

(T) : درجة الحرارة (K).

(dp) : قطر الجسيمات (nm).

أما رقم رينولدز (Re_b) للجسيمات يتحدد بالعلاقة [9] :

$$Re_b = \frac{1}{\vartheta_{bf}}.\sqrt{\frac{18k_p.T}{\pi.\rho_p.dp}} \qquad (16-2)$$

حيث : (ϑ_{bf}) : سرعة السائل الاساسي .

ومن الجدير بالذكر أن رقم رينولدز صغير جدا لقطر جسيمات بحجم النانو فعلى سبيل المثال ل

10nm من (AL_2o_3) في الماء رقم رينولدز هو (0.029) لذلك يمكن القول أن التدفق حول مادة النانو يقع في نظام ستوكس.

بافتراض التوزيع المتجانس للجسيمات النانوية دون حدوث أي تفاعل بين الجسيمات ويتم الحصول على المسافة بين مراكز الجسيمات من العلاقة[9] :

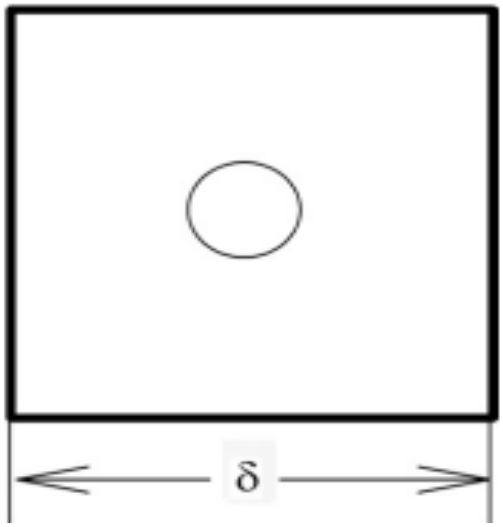
$$\delta = \sqrt[3]{\frac{\pi}{6\emptyset}}.dp \qquad (17-2)$$

حيث : (δ) : المسافة بين الجسيمات (nm).

$(\emptyset)$: كسر حجم الجسيمات.

(dp) : قطر الجسيمات (nm).

يبين الشكل $(2-1)$ التالي المسافة بين مراكز الجسيمات :



الشكل $(2-1)$ يبين المسافة بين مراكز الجسيمات.

من المفترض أن يتدفق السائل الذي يتمتع بسرعة براونية فوق مادة نانوية كروية ساكنة ومن المعروف أنه لا يوجد حل دقيق لتدفق السائل اللزج فوق جسيم صلب كروي عندما تكون حالة التدفق بعيدا عن الجسيمات غير مستقرة لذلك يجب تبسيط الحسابات .

عندما يكون $Re \ll 1$ يمكن اعتماد الحل باعتبار التدفق الزاحف حيث تم الحصول على هذا الحل من خلال الشروط الحدية للتدفق خارج الطبقة الحدية ، لذلك بدأ إدخال عامل تصحيح على الحل ليأخذ في الاعتبار هذا التبسيط (بافتراض وجود تيار بعيدا عن الكرة) وتصبح علاقة إجهاد القص كالتالي [9] :

$$\tau_{rr} = -3\left(\frac{\mu_{app}.V_b.c}{r_p}\right)\left(\left(\frac{r_p}{r}\right)^2 - \left(\frac{r_p}{r}\right)^4\right).\cos(\theta) \qquad (18-2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{3}{2}\left(\frac{\mu_{app}.V_b.c}{r_p}\right)\left(\left(\frac{r_p}{r}\right)^4\right).sin(\theta) \qquad (19-2)$$

حيث : (V_b) : سرعة الجسيمات .

(r_p) : نصف قطر الجسيمات ، (τ_{rr}) : إجهاد القص القطري.

(μ_{app}) : اللزوجة الظاهرية للسوائل النانوية ، $(\tau_{r\theta})$: إجهاد القص.

إجمالي إجهاد القص على سطح الجسيمات النانوية تحسب بالعلاقة[9] :

$$\tau_{total} = \int_0^{\pi} \tau_{r\theta}.d\theta = \frac{3\mu_{app}.V_b.c}{r_p} \qquad (20-2)$$

حيث : (C) : معامل تصحيح يتم حساب قيمته بالعلاقة [9] :

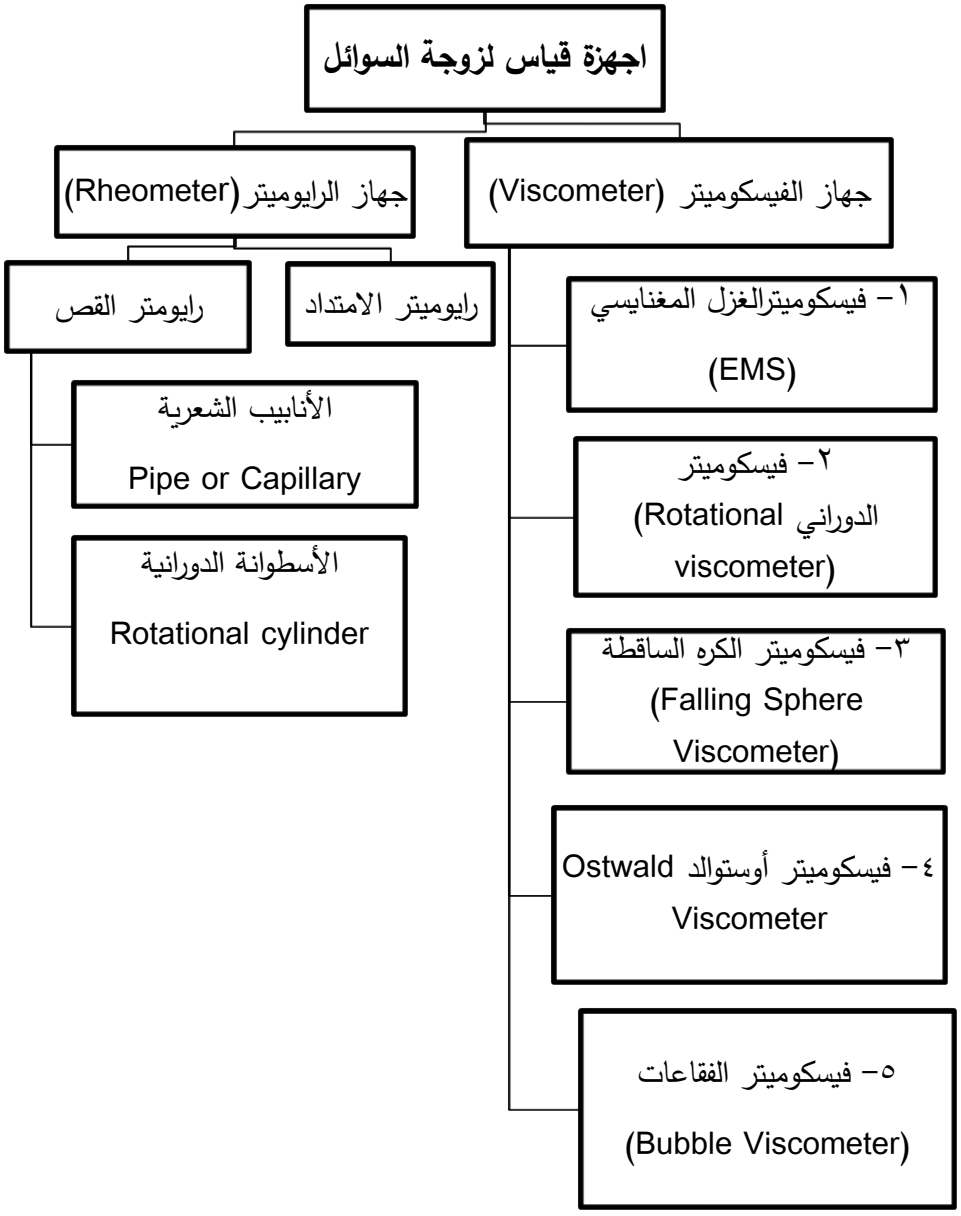
$$\mathrm{C} = {\mu_{bf}}^{-1}\left(\left(c_1.d_p + c_2\right).\emptyset + \left(c_3.d_p + c_4\right)\right) \qquad (21-2)$$

حيث : $(c_4\ , c_3, c_2, c_1)$ ثوابت .

(μ_{bf}) : لزوجة السائل الاساسي. (d_p): قطر الجسيمات .

7.2 لزوجة السوائل العادية:

1.7.2 تصنف أجهزة قياس لزوجة السوائل العادية كما يبينه الشكل التالي (2-2):



الشكل (2-2) يبين أجهزة قياس لزوجة السوائل العادية[2] .

1.1.7.2 جهاز الفيسكوميتر (Viscometer) :

يستخدم الفيسكوميتر لقياس اللزوجة في معظم الظروف، يستخدم للسوائل التي تكون قيمة لزوجتها لا تتغير تحت ظروف مختلفة من الجريان .

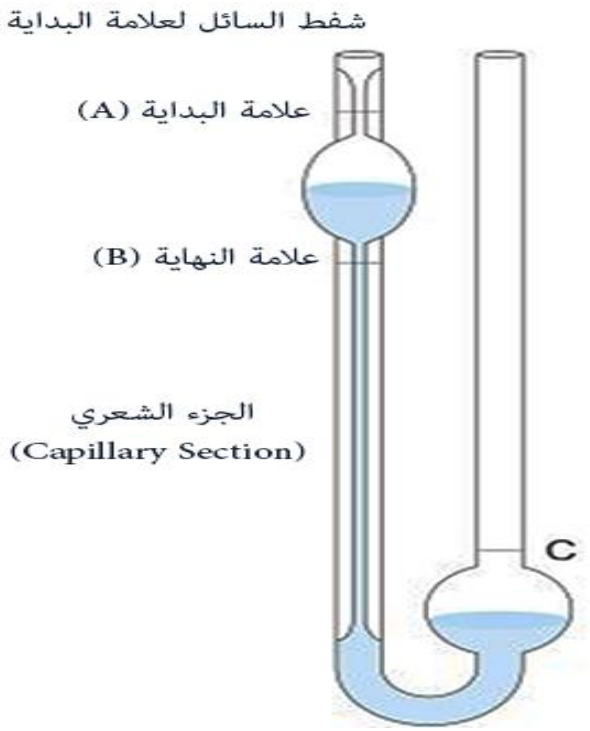
هناك عدة أنواع من مقاييس الفيسكوميتر المتاحة، بعضها يستخدم في المختبرات وبعضها متنقل من أجل اختبار اللزوجة. ومن أنواع مقاييس الفيسكومتر[2] :

1.1.1.7.2 فيسكوميتر اوستوالد (Ostwald Viscometer):

هذه الأجهزة تعرف أيضاً بفيسكوميتر الوعاء الشعري، وتعرف كذلك بفيسكوميتر أوستوالد (Ostwald Viscometer) سمي بذلك نسبة للعالم ويلهلم أوستوالد (Wilhelm Ostwald) وهو كيميائي وفيزيائي ألماني (1835–1932) [2].

يتكون هذا المقياس من أنبوبه شعرية موضوعه في وضع رأسي وتتصل بالانتفاخين (A ،B)الموجودين أعلاها ، ويتصل الطرف الأسفل للأنبوبة الشعرية بأنبوبة زجاجية على شكل حرف (U)بها انتفاخ في طرفها الأيمن (C)يكون أكثر انخفاضاً من الانتفاخين(A،B) تعلوه أنبوبه زجاجية.

كما في الشكل(2–3) الذي يوضح مبدأ عمل فيسكومتر أوستوالد.



الشكل (2–3) يوضح مبدأ عمل فيسكوميتر أستوالد.

مبدأ العمل:

- يوجه السائل حتى يملأ الانتفاخ الأعلى (A) وذلك عن طريق شفطه أو سحبه إليه.
- ثم يسمح للسائل بالهبوط من الانتفاخ (A)الى الانتفاخ (B)
- يقاس الزمن الذي يأخذه السائل لكي يهبط بين العلامتين (A ، B)وليكن (t_1) وهو يتناسب مع اللزوجة الحركية.

  نكرر التجربة ونفرض أن الزمن (t_2) .

نحسب اللزوجة النسبية للسائلين بالعلاقة :

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = \frac{\rho_1 . t_1 . K_1}{\rho_2 t_2 \, K_2} \qquad (22-2)$$

حيث:

ρ_1:الكثافة في اللحظة الزمنية t_1 (Kg/m^3) , ρ_2. :الكثافة في اللحظة الزمنية t_2 (Kg/m^3)

t: الزمن (Sec).

K:هو ثابت الأنبوبة الشعرية ويعتمد على بنية جهاز اللزوجة المستخدم وعند شراء مقياس اللزوجة بالأنبوبة الشعرية يعطي المصنع القيمة K حسب زمن جريان السائل.

مثلا: زمن جريان السائل(45sec) يكون K=0.022

2.1.1.7.2 فيسكوميتر الفقاعات (Bubble Viscometer) :

هذا النوع يستخدم لتحديد اللزوجة الحركية للسوائل بشكل سريع وذلك للسوائل كالراتنجات (resins) والورنيش (Varnishes)...الخ .

مبدأ العمل :

إن الوقت اللازم للحصول على صعود فقاعة هواء يتناسب طرداً مع لزوجة السائل، وبالتالي إذا ارتفعت الفقاعة بسرعة فذلك يعني أن لزوجة السائل منخفضة كما يبينه الشكل (2-4) .هذه الطريقة دقيقة إلى حدٍ كبير، ولكن القياسات يمكن أن تختلف نظراً لفروق الطفو وذلك بسبب تغيير شكل الفقاعة في الأنبوب، على أي حال هذا لا يسبب خطأً كبيراً في الحسابات[2] .

الشكل (2-4) يوضح فيسكوميتر الفقاعات.

3.1.1.7.2 فيسكوميتر الكره الساقطة(Falling Sphere Viscometer):

يناءا على قانون ستوكس الذي ينص على أن " قوة مقاومة السائل لكرة تسقط سقوطاً حراً فيه تتناسب طردياً مع معامل لزوجة هذا السائل، وقطر الكرة وسرعتها الحدية" .

وهذا القانون ينطبق فقط على مدى معين للسرعة ، أما إذا زادت عن حد معين فإن قوة مقاومة السائل تصبح متناسبة تناسباً طردياً مع مربع السرعة ، بعد لحظات من سقوط كرة معدنية في السائل المراد تعين معامل لزوجته، نجد بأنها تتوازن تحت تأثير ثلاث قوى وتتحرك بسرعة منتظمة أما القوى هي :

- قوة وزن الكرة (قوة الجاذبية الأرضية) ويكون اتجاهها لأسفل:

$$F_1 = mg = V_s\rho_s g F_1 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_s g \qquad (23-2)$$

- قوة دفع السائل للكرة (قوة دفع أرخميدس) وتكون متجهة إلى أعلى :

$$F_2 = V_s\rho_l g F_2 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_l g \qquad (24-2)$$

- قوة لزوجة السائل (قوة ستوكس) وتكون متجهة إلى أعلى:

$$F_3 = 6\pi\mu r v \qquad (25-2)$$

من القوى الثلاثة السابقة نستنتج أن السرعة التي تتحرك فيها الكرة :

$$v = \frac{2}{9}(p_s - p_l)\frac{g}{\mu}r^2 \qquad (26-2)$$

حيث إن:

m : كتلة الكرة(Kg).

r : نصف القطر (m).

V_s : حجم الكرة(m^3).

v : السرعة الحدية لسقوط الكرة(m/s).

ρ_s : كثافة مادة الكرة($\frac{Kg}{m^3}$).

ρ_l : كثافة السائل ($\frac{Kg}{m^3}$).

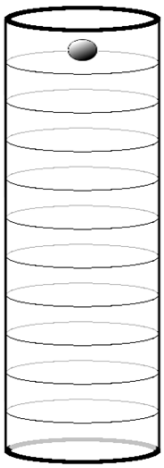
μ: اللزوجة التحركية للسائل (Pa.s).

مبدأ العمل:

نضع كره معدنية في كأس زجاجي يحتوي على كمية من سائل لزج مثل الجلسرين فإن الكرة ستهبط إلى قاع الكأس بسرعة متزايدة القيمة [2] .

ولكننا نلاحظ أن هذه السرعة سرعان ما تبلغ قيمة معينه تظل ثابته عندها لا تتعداها، وتسمى هذه السرعة بالسرعة النهائية . فإذا اسقط جسم من طائره في الجو ستزداد سرعته تدريجيا عقب سقوطه حتى يصل الى القيمة النهائية حيث تثبت عندها [2] .

إذا كانت الأجسام تسقط في السائل اللزج بوزنها الخاص تسمى سرعتها السرعة النهائية (Terminal Velocity) وتسمى أيضاً بالسرعة الحدية (Settling Velocity)، يتم التوصل لها عندما تكون قوة الإحتكاك مع قوة الطفو توازن قوة الجاذبية الأرضية كما في الشكل (2−5).



الشكل(2−5) يوضح عمل فيسكوميتر الكرة الساقطة.

وتحدد السرعة النهائية بالعلاقة(2−27):

$$V_s = \frac{2}{9}\frac{r^2 g(\rho_p - \rho_f)}{\mu} \qquad (27-2)$$

حيث :

V_s: سرعة الجسم النهائية (m/s) (تتجه للأسفل إذا كانت $\rho_p > \rho_f$ ، وتتجه للأعلى إذا كانت $\rho_p < \rho_f$).

r: نصف القطر للجسم (m).

g: الجاذبية الأرضية (m/s^2).

ρ_p: كثافة الجسم (kg/m^3).

ρ_f: كثافة السائل (kg/m^3).

μ: اللزوجة التحركية للسائل (Pa.s).

وتستخدم هذه العلاقة (2−27) لتعيين السرعة النهائية للكره الهابطة في سائل تقل كثافته أقل من كثافة الكرة. وتستخدم للحالة المثالية وقد صححت العلاقة وفقا للعالم لادينبورغ وأصبحت بالشكل التالي:

$$\mu_{true} = \frac{\mu_{measured}}{\left(1+\frac{2.4r}{R}\right)\left(1-\frac{3.3r}{h}\right)} \qquad (28-2)$$

حيث:

μ_{true} :اللزوجة المصححة (pa.s).

$\mu_{measured}$:اللزوجة المقاسة (pa.s).

r: نصف قطر الكرة (m)

R:قطر الاسطوانة التي تحتوي على السائل(m).

h:ارتفاع الاسطوانة(m).

الحد الأول من المقام $\left(1+\frac{2.4r}{R}\right)$ يعبر عن تصحيح تأثير الجدار.

الحد الثاني من المقام $\left(1-\frac{3.3r}{h}\right)$ يعبر تصحيح الارتفاع المنتهي للسائل.

على الرغم من ايجاد عدد من معاملات التصحيح إلا أن تعبير فاكسن يؤمن أفضل النتائج و يعطى معامل تصحيح فاكسن بالعلاقة:

$$\mu_{true} = \mu_{measured}\left[1-\frac{2.104r}{R}+2.09\left(\frac{r}{R}\right)^{3}-0.95\left(\frac{r}{R}\right)^{5}\right] \qquad (29-2)$$

حيث:

μ_{true}:اللزوجة المصححة (pa.s).

$\mu_{measured}$:اللزوجة المقاسة (pa.s).

r: نصف قطر الكرة (m)

R:قطر الاسطوانة التي تحتوي على السائل(m).

4.1.1.7.2 فيسكوميتر الغزل المغناطيسي Electromagnetically Spinning Sphere Viscometer (EMS) :

هذا النوع يقيس اللزوجة للسوائل من خلال مراقبة دوران جسم ما و الذي يحركه التفاعل الكهرومغناطيسي عن طريق مغناطيسين مثبتين بدائرة كهربائية منشئة بذلك حقلاً مغناطيسياً بالتناوب.

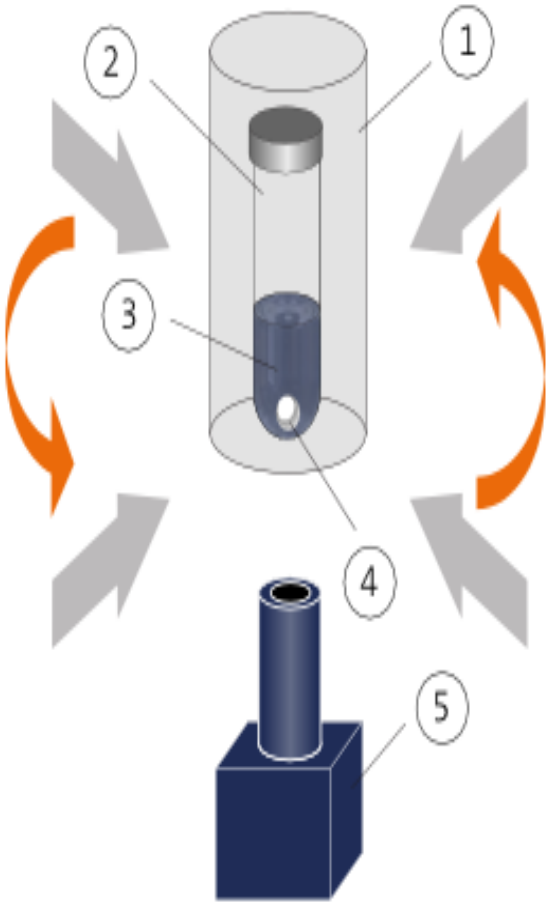
مبدأ العمل:

العينة (3) المراد قياسها موضوعة في أنبوب اختبار صغير (2). وفي الأنبوبة يوجد كرة مصنوعة من الألمنيوم (4). الأنبوب موضوع في غرفة التحكم في درجة الحرارة (1) وموقع كرة الألمنيوم يكون في الوسط بين مغناطيسين اثنين كما يبينه الشكل (2–6).

المجال المغناطيسي الدوار يدفع التيارات الدوامية في الكرة[2] .

تفاعل لورنتز (Lorentz) الناتج بين المجال المغناطيسي وهذه التيارات الدوامية يولد عزم الدوران الذي يقوم بجعل الكرة تدور. سرعة دوران الكرة يعتمد على سرعة دوران الحقل المغناطيسي، حجم الحقل المغناطيسي، ولزوجة العينة في جميع أنحاء الكرة.

ويتم رصد حركة الكرة بوساطة كاميرا فيديو (5) تقع أسفل الخلية.



الشكل (2–6) يوضح فيسكوميتر الغزل المغناطيسي.

يتميز عن أنواع الفيسكوميتر الاخرى بأنه :

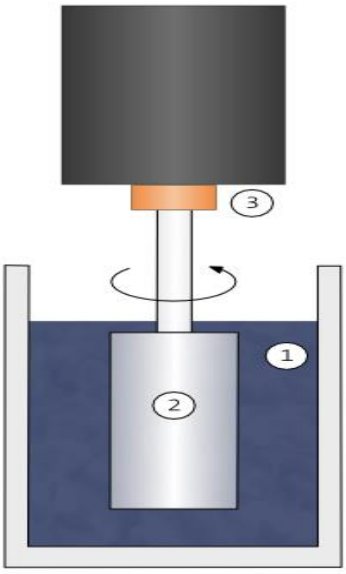
- جميع أجزاء هذا الفيسكوميتر التي تكون في اتصال مباشر مع العينة يتم نزعها وغير مكلفة.
- يتم إجراء القياسات في وعاء عينة مختومة.
- هذا الفيسكوميتر لا يتطلب سوى كميات صغيرة جداً من العينة .

عزم الدوران المطبق على الكرة يتناسب مع الفرق في السرعة الزاوية للمجال المغناطيسي Ω_B والكرة Ω_S. وبالتالي فإن هناك علاقة خطية بين $\frac{(\Omega_B - \Omega_S)}{\Omega_S}$ وبين لزوجة السائل.

5.1.1.7.2 فيسكوميتر الدوراني (Rotational viscometers):

هذه الطريقة تستخدم لقياس اللزوجة الظاهرية بين(260–38) درجة مئوية باستخدام جهاز اللزوجة الدوراني المزود بغرفة يتم التحكم بدرجة حرارتها للوصول الى درجة حرارة الاختبار.

وعلى سبيل المثال جهاز اللزوجة الدوراني الذي يستخدم لقياس مقاومة البيتومين النسبية للدوران حيث يستخدم العزم والسرعة لتعين لزوجة الاسفلت[2] .



الشكل(2–7) يوضح الفيسكوميتر الدوراني.

2.1.7.2 جهاز الرايوميتر (Rheometer):

الرايوميتر جهاز معملي يستخدم لقياس اللزوجة عند جريان السوائل، وخصوصاً الدم.

يتم استخدامه للسوائل التي لايمكن أن تحدد لزوجتها بقيمة واحدة، وبالتالي تتطلب المزيد من المعايير إلى أن يتم تعيين وقياس قيمتها كما هو الحال في الفيسكوميتر.

الشكل (2-8) يوضح جهاز الرايوميتر.

أنواع الرايوميتر:

يوجد نوعان مختلفان تماماً من الرايوميتر :

١- رايوميتر يتحكم بإجهاد القص ويسمى برايوميتر القص (Shear Rheometers) أو الرايوميتر الدوراني (Rotational Rheometer).

ويوجد منه عدة أنواع :

- الأنابيب الشعرية (Pipe or Capillary):

يمرر السائل عبر أنبوب ذي مقطع عرضي ثابت وأبعاده معلومة بدقة تحت ظروف الجريان الطبقي.

- الأسطوانة الدورانية(Rotational cylinder):

يتم وضع السائل داخل حلقة من أسطوانة واحدة داخل أسطوانة أخرى، وواحدة من هذه الأسطوانات يتم تدويرها بسرعة معينة، هذا يحدد معدل القص داخل الحلقة. السائل يميل إلى سحب الأسطوانة الأخرى حوله، ويتم قياس القوة التي تتم على هذه الأسطوانة، التي يمكن تحويلها إلى إجهاد القص.

٢- رايوميتر يتحكم بإجهاد الامتداد ويسمى برايوميتر الإمتداد (extensional rheometers)

الفصل الثالث

الدراسة الهيدروديناميكية لتطوير جهاز قياس لزوجة السوائل النانوية المقترح

(Hydrodynamic study for the development of a proposed nanofluid viscometer)

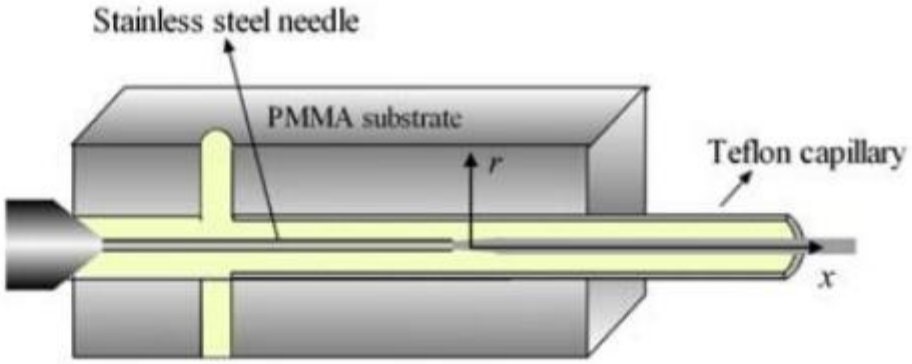
1.3 تمهيد Introduction:

في العقود الماضية كانت الاجهزة الدقيقة التي تستخدم في قياس اللزوجة محور العديد من الدراسات بهدف رفع كفاءتها وسلامتها والتحكم في سطحها ، واستخدمت على نطاق واسع للمستحلبات ، والتحليل البيولوجي ، والبلورة ، وتركيب الجسيمات النانوية . ويمكن قياس لزوجة أي سائل بناءاً على المعادلات عندما تكون لزوجة سائل اخر معروفة. من السمات الرئيسية للأجهزة الدقيقة أن القوى السطحية واللزوجة أصبحت مسيطرة في حين أن قوى العطالة والطفو تصبح ضئيلة للغاية.

2.3 وصف جهاز قياس اللزوجة :

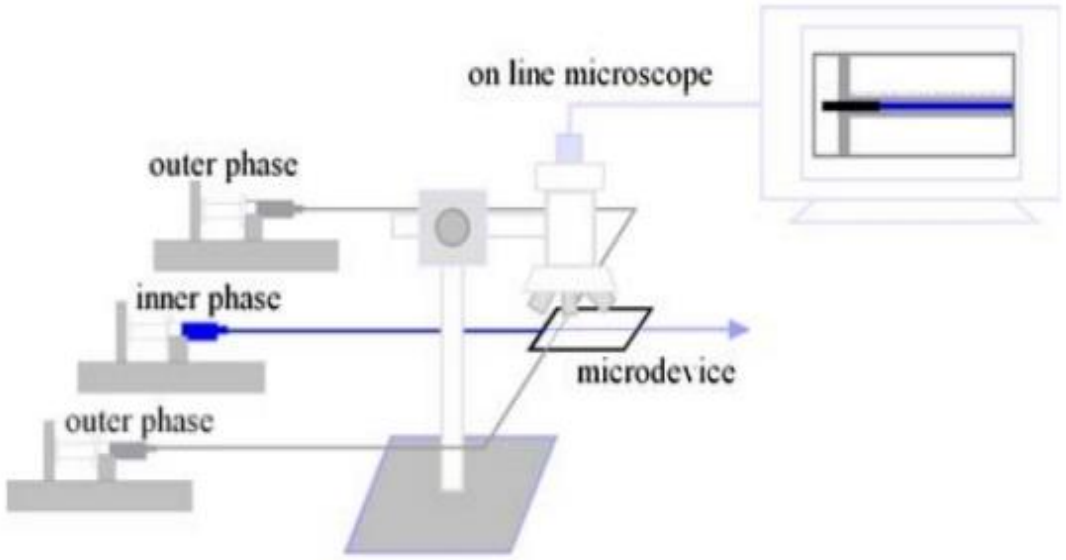
الجهاز الذي سنعمل على تطويره وتحسين خصائصه حتى يصبح قادراً على قياس لزوجة السوائل النانوية إضافة إلى مهمته في قياس لزوجة السوائل العادية .هو جهاز (co-axial microfluidic) ففي هذا الجهاز يكون تدفق السوائل ثابتاً وحركة هذه السوائل توصف من خلال معادلات نافييه ستوكس ، ويمكن قياس لزوجة أي من السوائل بناءاً على العلاقات وذلك عندما تكون لزوجة سائل آخر معروفة . والسوائل التي يتم اختبار لزوجتها تكون في المجال (0.6-40 mpa.s) .وتتميز هذه الطريقة بإمكانية التحكم فيها بدرجة كبيرة ويمكن الاعتماد عليها، وسهولة تصنيع الجهاز[5] .

حيث يتم قياس لزوجة السائل باستخدام تدفقات متوازية (سائل/سائل) في قناة صغيرة على شكل حرف (T) ، ومن معرفة معدلات تدفق السوائل والميزات الهندسية للقناة يمكن حساب متوسط معدل القص واللزوجة . الشكل(3-1) يوضح جهاز (microfluidic) المستخدم [5] :



الشكل (3–1) يوضح جهاز (microfluidic).

حيث يتم تثبيت أنبوب شعرية من (Teflon) بقطر داخلي (0.5 mm)على أنه قناة رئيسية للتدفق ، بينما يتم إدخال إبرة من (Stainless Steel) في الانبوب الخاص بتدفق المرحلة الداخلية ، القطر الخارجي (0.34 mm)، والقطر الداخلي (0.16 mm) ، ثم إغلاق الجهاز باستخدام لوحة اخرى بحجم (40 mm*20 mm*1 mm) مع تقنية منع التسرب بمساعدة الموجات فوق الصوتية، واستخدام مجهر مقرون بكاميرا فيديو (CCD) عالية السرعة لمراقبة نمط التدفق في الجهاز . تم استخدام ثلاث مضخات لضخ السوائل في الجهاز . الشكل (3–2) التالي يوضح المخطط الانسيابي للتجربة . حيث تقوم المضخات الخارجية بضخ السائل معلوم قيمة اللزوجة في القناة الخارجية والسائل مجهول قيمة اللزوجة في القناة الداخلية[5] .



الشكل (3−2) يوضح المخطط الانسيابي للتجربة .

في أثناء جريان السائل في القنوات الدقيقة يستخدم مفهوم رقم الرابطة (B_o) والرقم الشعري (C_a) التي يتم حسابها بالعلاقات التالية[5] :

$$B_o = \frac{(\rho_o - \rho_i) * g * (d_f)^2}{\vartheta} \qquad (1-3)$$

حيث : (ρ_o) كثافة السائل الخارجي $(\frac{Kg}{m^3})$.

(ρ_i) كثافة السائل الداخلي $(\frac{Kg}{m^3})$.

(g) تسارع الجاذبية الأرضية .

(d_f) قطر تدفق المرحلة الداخلية (m) . .

$$C_a = \frac{\mu_o * U_o}{\vartheta} \qquad (2-3)$$

حيث : (μ_o) لزوجة السائل في المرحلة الخارجية (pa.s) .

(U_o) سرعة سائل المرحلة الخارجية $(\frac{m}{s})$.

نسبة رقم الرابطة إلى الرقم الشعري $(\frac{B_o}{C_a})$ تصف المقارنة بين تأثير الطفو وتأثير القص للتدفق الخارجي على تدفق المرحلة الداخلية [5] .

نحن سوف نعمل على تطوير هذا الجهاز وتوسيع مجال القيم التي يقوم بقياسها، واشتقاق العلاقة المناسبة التي نستطيع من خلالها حساب لزوجة السوائل النانوية بدلالة السائل الاساسي والعكس صحيح .

3.3 استنتاج علاقة سرعات التدفق الداخلي والخارجي:

بالانطلاق من معادلة الاستمرار :

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \qquad (3-3)$$

حيث : (u): السرعة باتجاه المحور X .

(v): السرعة باتجاه المحور Y.

(w): السرعة باتجاه المحور Z.

ومعادلة نافييه ستوكس بالشكل الشعاعي :

$$\rho\left(\frac{d}{dt}\vec{V}+\vec{V}.\nabla\vec{V}\right)=\rho.\vec{g}-\nabla p+\mu\nabla^2.\vec{V} \qquad (4-3)$$

حيث : (ρ) : كثافة السائل($\frac{Kg}{m^3}$).

(V): سرعة السائل($\frac{m}{sec}$) .

(p): الضغط(pa).

(μ): اللزوجة التحريكية للسائل (pa.s).

وبإسقاط معادلة نافييه ستوكس على المحاور الاحداثية نجد مايلي :

معادلة نافييه ستوكس باتجاه المحور (X) :

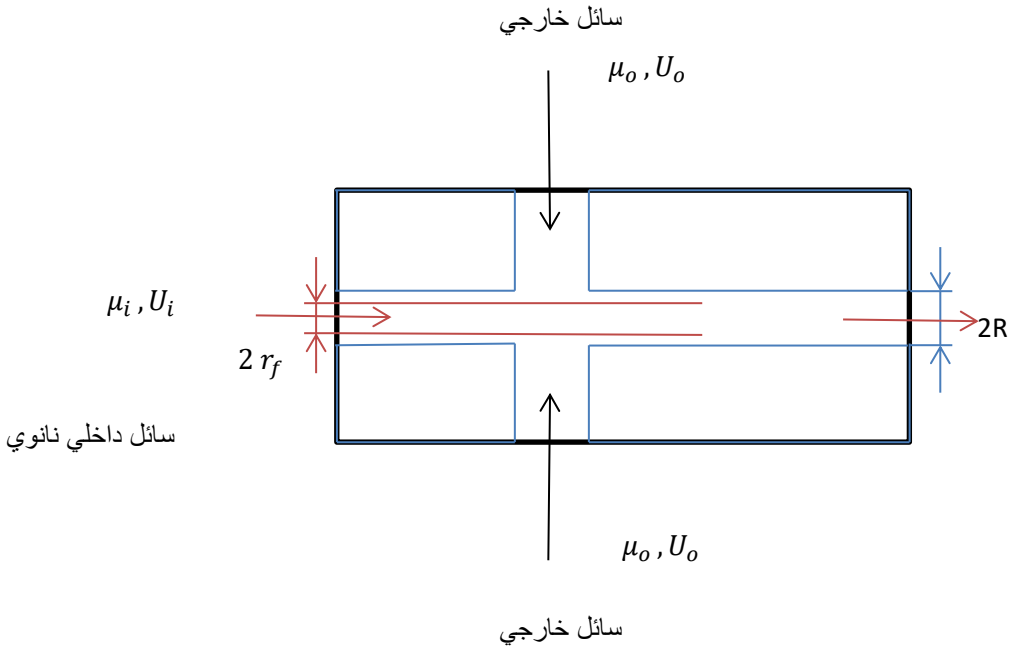
$$\rho\left(\frac{du}{dt}+u\frac{du}{dx}+\mathrm{v}\frac{du}{dy}+\mathrm{w}\frac{du}{dz}\right)=\rho g-\frac{dp}{dx}+\mu\left(\frac{d2u}{du^2}+\frac{d2u}{dy^2}+\frac{d2u}{dz^2}\right) \qquad (5-3)$$

معادلة نافييه ستوكس باتجاه المحور (Y) :

$$\rho\left(\frac{dv}{dt}+u\frac{dv}{dx}+\mathrm{v}\frac{dv}{dy}+\mathrm{w}\frac{dv}{dz}\right)=\rho g-\frac{dp}{dy}+\mu\left(\frac{d2v}{du^2}+\frac{d2v}{dy^2}+\frac{d2v}{dz^2}\right) \qquad (6-3)$$

معادلة نافييه ستوكس باتجاه المحور (Z) :

$$\rho\left(\frac{dw}{dt}+u\frac{dw}{dx}+\mathrm{v}\frac{dw}{dy}+\mathrm{w}\frac{dw}{dz}\right)=\rho g-\frac{dp}{dz}+\mu\left(\frac{d2w}{du^2}+\frac{d2w}{dy^2}+\frac{d2w}{dz^2}\right) \qquad (7-3)$$



الشكل (3–3) يبين جهاز قياس اللزوجة وأبعاده والتدفقات .

من معادلة الاستمرار ومعادلة نافيه ستوكس نحصل على تغير الضغط بالاتجاه Z :

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu_o \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r . \frac{\partial u_o}{\partial r} \right) \right) \qquad (8-3)$$

وفي الاتجاه X يكون تغير الضغط :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu_i \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r . \frac{\partial u_i}{\partial r} \right) \right) \qquad (9-3)$$

من المعادلة (3–9) نجد أن :

$$\frac{r}{\mu_i} . \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial r} \left(r . \frac{\partial u_i}{\partial r} \right) \qquad (10-3)$$

ثم بالمكاملة بالنسبة إلى (r) نجد أن :

$$\frac{r^2}{2\mu_i} . \frac{\partial p}{\partial x} + c_1 = r . \frac{\partial u_i}{\partial r} \qquad (11-3)$$

بالتقسيم على (r) نجد أن :

$$\frac{r}{2\mu_i}.\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{c_1}{r}=\frac{\partial u_i}{\partial r} \qquad (12-3)$$

بالمكاملة بالنسبة ل (r) مرة ثانية نجد أن :

$$u_i=\frac{r^2}{4\mu_i}.\frac{\partial p}{\partial x}+c_1.\ln r+c_2 \qquad (13-3)$$

لإيجاد الثوابت (c_1 و c_2) من الشروط الحدية :

عندما ($r=0$) $\Leftarrow \frac{\partial u_i}{\partial r}=0$ بالتعويض بالمعادلة $(12-3)$ $\Leftarrow$ $c_1=0$

عندما($r=r_f$) $\Leftarrow$ $u_i=u_o$ بالتعويض بالمعادلة $(13-3)$

$\Leftarrow$ $c_2=u_o-\frac{{r_f}^2}{4\mu_i}.\frac{\partial p}{\partial x}$

نعوض قيمة (c_1 و c_2) في المعادلة $(13-3)$ $\Leftarrow$

$$u_i=\frac{r^2}{4\mu_i}.\frac{\partial p}{\partial x}+u_o-\frac{{r_f}^2}{4\mu_i}.\frac{\partial p}{\partial x} \qquad (14-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$u_i-u_o=\frac{1}{4\mu_i}.\frac{\partial p}{\partial x}(r^2-{r_f}^2) \qquad (15-3)$$

من المعادلة $(3-8)$ وبطريقة مماثلة لما سبق نجد ما يلي :

$$\frac{\partial u_o}{\partial r}=\frac{r}{2\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{c_3}{r} \qquad (16-3)$$

$$u_o=\frac{r^2}{4\mu_0}.\frac{\partial p}{\partial z}+c_3.\ln r+c_4 \qquad (17-3)$$

لإيجاد الثوابت $(c_3$ و$c_4)$ من الشروط الحدية :

عندما $(r=r_f) \Leftarrow u_i = u_o \Leftarrow$ بالتعويض بالمعادلة $(3-17) \Leftarrow$

$$u_i = \frac{{r_f}^2}{4\mu_0}.\frac{\partial p}{\partial z} + c_3.\ln r_f + c_4 \qquad (3-18)$$

عندما $(r=R) \Leftarrow u_o = 0 \Leftarrow$ بالتعويض بالمعادلة $(3-17) \Leftarrow$

$$0 = \frac{R^2}{4\mu_0}.\frac{\partial p}{\partial z} + c_3.\ln R + c_4 \qquad (3-19)$$

بطرح المعادلتين (3-18) و (3-19) نجد ما يلي :

$$u_i = \frac{{r_f}^2}{4\mu_0}.\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{R^2}{4\mu_0}.\frac{\partial p}{\partial z} + c_3.\ln r_f - c_3.\ln R \qquad (3-20)$$

بالإصلاح نحصل على قيمة الثابت (c_3) :

$$c_3 = \frac{u_i - \frac{1}{4\mu_0}.\frac{\partial p}{\partial z}({r_f}^2 - R^2)}{\ln\frac{r_f}{R}} \qquad (3-21)$$

ثم لإيجاد (c_4) نعوض في المعادلة (3-18) :

$$c_4 = -\frac{R^2}{4\mu_0}.\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{u_i - \frac{1}{4\mu_0}.\frac{\partial p}{\partial z}({r_f}^2 - R^2)}{\ln\frac{r_f}{R}}.\ln R \qquad (3-22)$$

نعوض العلاقات (3−21) و(3−22) في العلاقة (3−17) نجد ما يلي :

$$u_o = \frac{r^2}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{u_{i-}\frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\left({r_f}^2 - R^2\right)}{\ln\frac{r_f}{R}}.\ln r - \frac{R^2}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{u_{i-}\frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\left({r_f}^2 - R^2\right)}{\ln\frac{r_f}{R}}.\ln R \qquad (23-3)$$

وبالإصلاح نجد أن :

$$u_o = \frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.(r^2 - R^2) + \frac{u_{i-}\frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\left({r_f}^2 - R^2\right)}{\ln\frac{r_f}{R}}.(\ln r - \ln R) \qquad (24-3)$$

وبالإصلاح أيضا نجد أن :

$$u_o = \frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.(r^2 - R^2) + \frac{u_{i-}\frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\left({r_f}^2 - R^2\right)}{\ln\frac{r_f}{R}}.\left(\ln\frac{r}{R}\right) \qquad (25-3)$$

وبإجراء رياضي بسيط نجد أن:

$$u_o = \frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.(r^2 - R^2) + \left[u_{i-}\frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\left({r_f}^2 - R^2\right)\right].\left(\frac{\ln\frac{r}{R}}{\ln\frac{r_f}{R}}\right) \qquad (26-3)$$

الصيغة النهائية لعلاقة (u_o) تصبح :

$$u_o = \frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.(r^2 - R^2) + \left[u_{i-}\frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\left({r_f}^2 - R^2\right)\right].\ln(\frac{r}{r_f}) \qquad (27-3)$$

للحصول على سرعة تدفق السائل الداخلي نقوم بالتعويض في المعادلة (3−27) الشروط الحدية :

$$r = r_f \Rightarrow u_o = \frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.\left({r_f}^2 - R^2\right) \qquad (28-3)$$

ثم نعوض العلاقة $(3-28)$ في العلاقة $(3-15)$:

$$u_i - \frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial x}.\left({r_f}^2 - R^2\right) = \frac{1}{4\mu_i}.\frac{\partial p}{\partial x}\left(r^2 - {r_f}^2\right) \qquad (29-3)$$

بالإصلاح نجد أن:

$$u_i = \frac{1}{4\mu_i}.\frac{\partial p}{\partial x}\left(r^2 - {r_f}^2\right) + \frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.\left({r_f}^2 - R^2\right) \qquad (30-3)$$

الصيغة النهائية لعلاقة (u_i) تصبح :

$$u_i = \frac{1}{4}.\frac{\partial p}{\partial x}\left[\frac{\left(r^2 - {r_f}^2\right)}{\mu_i} - \frac{\left(R^2 - {r_f}^2\right)}{\mu_o}\right] \qquad (31-3)$$

4.3 استنتاج معدل تدفق السائل الداخلي والخارجي:

1.4.3 معدل تدفق السائل الداخلي :

من العلاقة :

$$Q_i = \int_0^{r_f} u_i.dA \qquad (32-3)$$

ونعلم أن :

$$dA = 2\pi r.dr \qquad (33-3)$$

بالتعويض في العلاقة (3−32) نجد أن :

$$Q_i = \int_0^{r_f} u_i . 2\pi r \, dr \qquad (34-3)$$

ثم نعوض العلاقة (3−31) في العلاقة (3−34) فنجد ما يلي :

$$Q_i = \int_0^{r_f} [\frac{1}{4} . \frac{\partial p}{\partial x} \left[\frac{\left(r^2 - {r_f}^2\right)}{\mu_i} - \frac{\left(R^2 - {r_f}^2\right)}{\mu_o} \right]] 2\pi r \, dr \qquad (35-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$Q_i = \frac{2\pi}{4} . \frac{\partial p}{\partial x} . \int_0^{r_f} \left[\left[\frac{\left(r^2 - {r_f}^2\right)}{\mu_i} - \frac{\left(R^2 - {r_f}^2\right)}{\mu_o} \right] \right] r \, dr \qquad (36-3)$$

بالإصلاح أيضا نجد أن :

$$Q_i = \frac{2\pi}{4} . \frac{\partial p}{\partial x} . \int_0^{r_f} \left[\left[\frac{\left(r^3 - r . {r_f}^2\right)}{\mu_i} - \frac{\left(r . R^2 - r . {r_f}^2\right)}{\mu_o} \right] \right] dr \qquad (37-3)$$

بالمكاملة نجد أن :

$$Q_i = \frac{2\pi}{4} . \frac{\partial p}{\partial x} . \left[\frac{\left(r^4 - 2r^2 . {r_f}^2\right)}{4\mu_i} - \frac{\left(r^2 . R^2 - r^2 . {r_f}^2\right)}{2\mu_o} \right]_0^{r_f} \qquad (38-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$Q_i = \frac{\pi}{8}.\frac{\partial p}{\partial x}.\left[\frac{\left(4{r_f}^4 - 8.{r_f}^2\right)}{\mu_i} - \frac{\left(2.{r_f}^2.R^2 - {r_f}^4\right)}{\mu_o}\right] \qquad (39-3)$$

بالإصلاح أيضا نجد أن :

$$Q_i = \frac{\pi}{8}.\frac{\partial p}{\partial x}.\left[\frac{\left(-4.{r_f}^4\right)}{\mu_i} - \frac{\left(2.{r_f}^2.R^2 - {r_f}^4\right)}{\mu_o}\right] \qquad (40-3)$$

أو :

$$Q_i = -\frac{\pi}{8}.\frac{\partial p}{\partial x}.\left[\frac{\left(4.{r_f}^4\right)}{\mu_i} + \frac{\left(2.{r_f}^2.R^2 - {r_f}^4\right)}{\mu_o}\right] \qquad (41-3)$$

ومنه الصيغة النهائية لعلاقة (Q_i) :

$$Q_i = -\frac{\pi}{8}.\frac{\partial p}{\partial x}.\left[\frac{\left(4.{r_f}^4\right)}{\mu_i} + \frac{\left(2.{r_f}^2(.R^2 - {r_f}^2)\right)}{\mu_o}\right] \qquad (42-3)$$

2.4.3 معدل تدفق السائل الخارجي:

من العلاقة :

$$Q_o = \int_{r_f}^{R} u_o.dA \qquad (43-3)$$

ونعلم أن :

$$dA = 2\pi r.dr \qquad (44-3)$$

وبالتعويض في العلاقة (3−43) نجد أن :

$$Q_o = \int_{r_f}^{R} u_o.2\pi r\,dr \qquad (45-3)$$

ثم نعوض العلاقة (3−28) في العلاقة (3−45) فنجد ما يلي :

$$Q_o = \int_{r_f}^{R} \frac{1}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.(r^2 - R^2).2\pi r\,dr \qquad (46-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$Q_o = \frac{2\pi}{4\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\int_{r_f}^{R}(r^2 - R^2).r\,dr \qquad (47-3)$$

بالإصلاح أيضا نجد ما يلي :

$$Q_o = \frac{\pi}{2\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\int_{r_f}^{R}(r^3 - rR^2).dr \qquad (48-3)$$

بالمكاملة نجد أن :

$$Q_o = \frac{\pi}{2\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.\left[\frac{(r^4)}{4} - \frac{(r^2.R^2)}{2}\right]_{r_f}^{R} \qquad (49-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$Q_o = \frac{\pi}{2\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\left[\frac{(R^4)}{4} - \frac{(R^4)}{2} - \frac{{r_f}^4}{4} + \frac{{r_f}^2.R^2}{2}\right] \qquad (50-3)$$

ومنه الصيغة النهائية لعلاقة (Q_o) :

$$Q_o = -\frac{\pi}{8\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}\left[R^4 + {r_f}^2\left({r_f}^2 - 2R^2\right)\right] \qquad (51-3)$$

5.3 استنتاج العلاقة التي تربط بين لزوجة السائل الداخلي ولزوجة السائل الخارجي:

بوضع النسبة بين علاقتي تدفق السائل الخارجي العلاقة (3−51) والداخلي العلاقة (3−42) نجد ما يلي :

$$\frac{Q_o}{Q_i} = \frac{-\frac{\pi}{8\mu_o}.\frac{\partial p}{\partial z}.(R^4 + {r_f}^2({r_f}^2 - 2R^2))}{-\frac{\pi}{8}.\frac{dp}{dx}(\frac{4{r_f}^4}{\mu_i} + \frac{2{r_f}^2(R^2 - {r_f}^2)}{\mu_o})} \qquad (52-3)$$

وبالتالي بعد الإصلاح نجد أن :

$$\frac{Q_o}{Q_i} = \frac{\frac{1}{\mu_o}(R^4 + {r_f}^2({r_f}^2 - 2R^2))}{\frac{4{r_f}^4}{\mu_i} + \frac{2{r_f}^2(R^2 - {r_f}^2)}{\mu_o}} \qquad (53-3)$$

ومنه يكون :

$$\frac{Q_o}{Q_i} = \frac{\frac{1}{\mu_o}(R^4 + {r_f}^2({r_f}^2 - 2R^2))}{\frac{4\mu_o{r_f}^4 + 2\mu_i{r_f}^2(R^2 - {r_f}^2)}{\mu_i.\mu_o}} \qquad (54-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{Q_o}{Q_i} = \frac{\mu_i . \mu_o . \frac{1}{\mu_o}(R^4 + {r_f}^2({r_f}^2 - 2R^2))}{4\mu_o {r_f}^4 + 2\mu_i {r_f}^2(R^2 - {r_f}^2)} \qquad (55-3)$$

بالإصلاح أيضا نجد ما يلي :

$$\frac{Q_o}{Q_i} = \frac{\mu_i . (R^4 + {r_f}^2({r_f}^2 - 2R^2))}{4\mu_o {r_f}^4 + 2\mu_i {r_f}^2(R^2 - {r_f}^2)} \qquad (56-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{Q_o}{Q_i} = \frac{R^4 + {r_f}^2({r_f}^2 - 2R^2)}{4\frac{\mu_o}{\mu_i}{r_f}^4 + 2{r_f}^2(R^2 - {r_f}^2)} \qquad (57-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{Q_o}{Q_i}\left(4\frac{\mu_o}{\mu_i}{r_f}^4 + 2{r_f}^2\left(R^2 - {r_f}^2\right)\right) = R^4 + {r_f}^2\left({r_f}^2 - 2R^2\right) \qquad (58-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{Q_o}{Q_i}\left(4\frac{\mu_o}{\mu_i}{r_f}^2 + 2R^2 - 2{r_f}^2\right) = \frac{R^4}{{r_f}^2} + {r_f}^2 - 2R^2 \qquad (59-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$4\frac{Q_o}{Q_i}.\frac{\mu_o}{\mu_i}{r_f}^2 = \frac{R^4}{{r_f}^2} + {r_f}^2 - 2R^2 - 2\frac{Q_o}{Q_i}.R^2 + 2\frac{Q_o}{Q_i}.{r_f}^2 \qquad (60-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{Q_o}{Q_i}.\frac{\mu_o}{\mu_i}=\frac{1}{4}+\frac{R^2}{2{r_f}^2}\left(\frac{R^2}{2{r_f}^2}-1\right)+\frac{Q_o}{Q_i}\left(\frac{1}{2}-\frac{R^2}{2{r_f}^2}\right) \qquad (61-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{Q_o}{Q_i}.\frac{\mu_o}{\mu_i}=\frac{1}{4}+\frac{1}{4}.\frac{R^2}{{r_f}^2}\left(\frac{R^2}{{r_f}^2}-2\right)+\frac{1}{2}.\frac{Q_o}{Q_i}\left(1-\frac{R^2}{{r_f}^2}\right) \qquad (62-3)$$

ومنه نجد أن :

$$\frac{Q_i}{Q_o}.\frac{\mu_i}{\mu_o}=\frac{4}{1+\frac{R^2}{{r_f}^2}\left(\frac{R^2}{{r_f}^2}-2\right)+2\frac{Q_o}{Q_i}(1-\frac{R^2}{{r_f}^2})} \qquad (63-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{Q_i}{Q_o}.\mu_i=\frac{4\mu_o}{1+\frac{R^2}{{r_f}^2}\left(\frac{R^2}{{r_f}^2}-2\right)+2\frac{Q_o}{Q_i}(1-\frac{R^2}{{r_f}^2})} \qquad (64-3)$$

ومنه يكون :

$$\frac{Q_i}{Q_o}.\mu_i=\frac{4\mu_o}{1+2\frac{Q_o}{Q_i}-2\left(1+\frac{Q_o}{Q_i}\right)\frac{R^2}{{r_f}^2}+\frac{R^4}{{r_f}^4}} \qquad (65-3)$$

نفرض أن :

$$A=\frac{Q_i}{Q_o} \qquad (66-3)$$

نفرض أيضا :

$$B = \frac{4\mu_o}{1 + 2\frac{Q_o}{Q_i} - 2\left(1 + \frac{Q_o}{Q_i}\right)\frac{R^2}{{r_f}^2} + \frac{R^4}{{r_f}^4}} \qquad (67-3)$$

نحصل على العلاقة النهائية :

$$A.\mu_i = B \qquad (68-3)$$

6.3 تحليل الأخطاء:

إن دقة القياس تعتمد بشكل أساسي على دقة قطر المرحلة الداخلية ودقة الرؤية الخارجية ومعدلات التدفق الداخلية والخارجية . حيث يتم إجراء تحليل عام للأخطاء كما يلي:

نفرض أن :

$$E = \frac{Q_o}{Q_i} \qquad (69-3)$$

نقرض أيضا :

$$F = \frac{R^2}{{r_f}^2} \qquad (70-3)$$

نعوض العلاقتين $(3-69)$ و$(3-70)$ في العلاقة $(3-65)$ وبالإصلاح نجد ما يلي :

$$\mu_i = \frac{E\mu_o}{1 + 2\mathrm{E} - 2(1+\mathrm{E})\mathrm{F} + \mathrm{F}^2} \qquad (71-3)$$

باشتقاق العلاقة $(3-69)$ نجد أن :

$$\delta E = \delta\left(\frac{Q_o}{Q_i}\right) = \frac{\delta Q_o . Q_i - \delta Q_i . Q_o}{{Q_i}^2} = \frac{Q_i . \delta Q_o}{{Q_i}^2} - \frac{Q_o . \delta Q_i}{{Q_i}^2} \qquad (72-3)$$

بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{Q_i}{Q_o}\frac{Q_i . \delta Q_o}{{Q_i}^2} - \frac{Q_i}{Q_o}\frac{Q_o . \delta Q_i}{{Q_i}^2} = \frac{\delta Q_o}{Q_o} - \frac{\delta Q_i}{Q_i} \qquad (73-3)$$

باشتقاق العلاقة $(3-70)$ نجد أن :

$$\delta F = \delta\left(\frac{R^2}{{r_f}^2}\right) = \frac{\delta R^2 . {r_f}^2 - R^2 . \delta {r_f}^2}{{r_f}^4} \qquad (74-3)$$

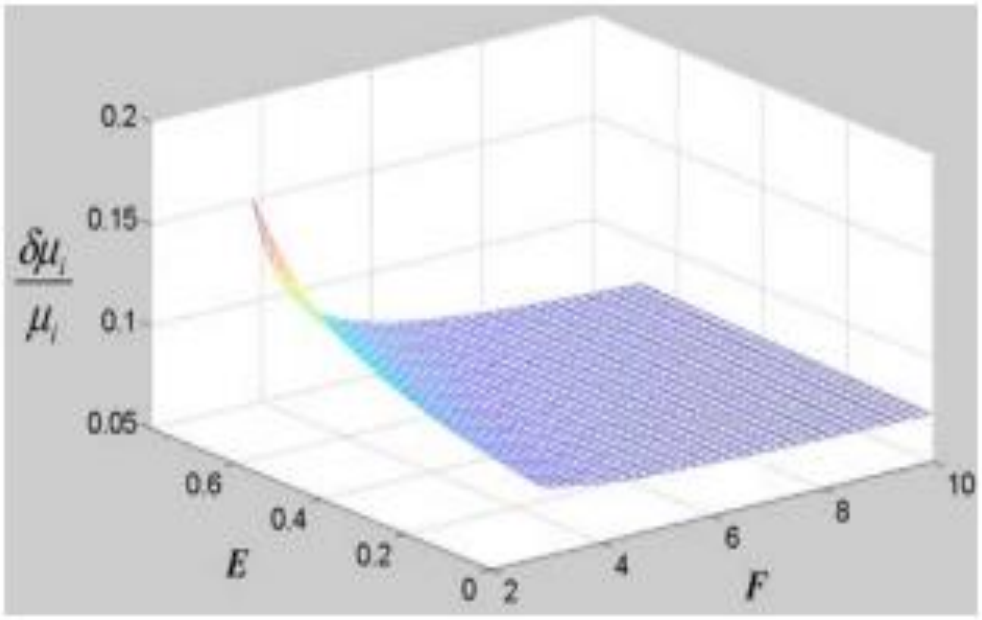
بالإصلاح نجد أن :

$$\frac{\delta F}{F} = \frac{\delta R^2 . {r_f}^2 - R^2 . \delta {r_f}^2}{{r_f}^4} . \frac{{r_f}^2}{R^2} = \frac{\delta R^2}{R^2} - \frac{\delta {r_f}^2}{{r_f}^2} \qquad (75-3)$$

باشتقاق العلاقة $(3-71)$ نجد أن :

$$\frac{\delta \mu_i}{\mu_i} = \left(\left(\frac{\delta \mu_o}{\mu_o}\right)^2 + \left(\frac{(1+F)^2}{1+2E-2(1+E)F+F^2} . \frac{\delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{2(1+E).F - 2F^2}{1+2E-2(1+E)F+F^2} . \frac{\delta F}{F}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (76-3)$$

من خلال العلاقات السابقة والشكل $(3-4)$ نلاحظ أن خطأ القياس يقل بزيادة (F) وانخفاض (E)، أي بانخفاض نصف القطر الداخلي(r_f) وزيادة التدفق الداخلي(Q_i).



الشكل (3–4) يبين خطأ القياس.

7.3 التعديلات على تصميم الجهاز:

من الاشكال (3–1) ، (3–2) حيث كانت أبعاد الجهاز القطر الخارجي (R =0.34 mm)، والقطر الداخلي (r_f =0.16 mm) كما هي موضحة في الشكل (3–3) .

النسبة بين القطر الخارجي والداخلي ($\frac{R}{r_f} = \frac{0.34}{0.16} = 2.125$) ، قمنا بالمحافظة على نفس النسبة وإنقاص القطر الداخلي للحصول على نسبة خطأ أقل حيث أصبحت أبعاد الجهاز كالتالي (R=0.255 mm) ، ($r_f = 0.12\ mm$).

وانطلاقا من العلاقات (3–69) ، (3–70) ، (3–71)

مع تعويض ابعاد الجهاز(R=0.255 mm) ، ($r_f = 0.12\ mm$) ومع العلم أن تدفق المضخات معلوم ($Q_i = 40ml/min$) ، ($Q_o = 25ml/min$) ومعرفة لزوجة السائل الخارجي الذي هو السائل الاساسي يمكن الحصول على لزوجة السائل النانوي

الفصل الرابع

النمذجة والمحاكاة وتحليل النتائج

(Modeling, simulation and analysis of results)

1.4 تمهيد (Introduction):

استعملت الطرق العددية لحل مشاكل جريان الموائع وانتقال الحرارة باعتبارها نتيجة لصعوبة الحل التحليلي المرتبط بالمشاكل الهندسية العملية وفي أغلب الاحوال يكون الحل التحليلي مستحيلا ويحتم استعمال الطرق العددية وهناك عوامل كثيرة تستدعي استخدام الطرق العددية منها تعقيدات الشكل الهندسي وعدم انتظام الشروط الحدية واعتمادها على عامل الزمن وغيرها.

الطرق العددية المستعملة في الحساب تعرف بمصطلح مشهور وهو التقسيم (Meshing) وهو عملية تقسيم المجال الحاسوبي إلى عدد من النقاط كل نقطة تمثل بمعادلة .

وضعت الأسس الرياضية لنظرية المرونة في القرنين السابع عشر والثامن عشر على يد علماء مثل هوك (Hook) و أويلر (Euler) الذين ركزوا الاهتمام على علاقات (الإجهاد – التشوه) وعلى استخراج حلول المعادلات التفاضلية الحاكمة لمرونة الاجسام اعتمادا على مبادئ الطاقة.

وفي القرن التاسع عشر أسهم علماء ومهندسون مثل نافييه ستوكس (Nervier) وسانت فينانت وماكسويل (Maxwell) وكاستيليانو(Castiglione) ومور في تطوير تطبيقات نظرية الإنشاءات استنادا إلى المبادئ الرياضية التي وضعت سابقا وانحصرت التطبيقات الاساسية في إيجاد حلول مباشرة لفئة صغيرة من المنشآت الأساسية ذات الشكل الهندسي البسيط لأن حلول التطبيقات الأكثر تعقيدا تقتضي مقدرة حسابية لم تكن متوافرة آنذاك.

2.4 أسلوب ديناميك الموائع الحاسوبي (Computational Fluid Dynamic ((CFD)) :

علم ديناميكا الموائع الحاسوبي هو أسلوب يقوم بالتنبؤ بحركة الموائع ، انتقال الحرارة وانتقال الكتلة , التفاعلات الكيميائية والعديد من المسائل الهندسية المتعلقة بجريان الموائع حيث يتم صياغة المسألة المعينة في شكل نموذج رياضي فيزيائي وذلك بتحديد المعادلات التفاضلية الجزيئية الحاكمة للمشكلة وتحويل هذه المعادلات التفاضلية الحاكمة إلى معادلات جبرية ويتم ذلك باستخدام الطرق العددية مثل:

١. طريقة العناصر المنتهية(FEM) .
٢. طريقة الحجوم المحددة.(FVM) .
٣. طريقة الفروقات المحددة.(FDM) .

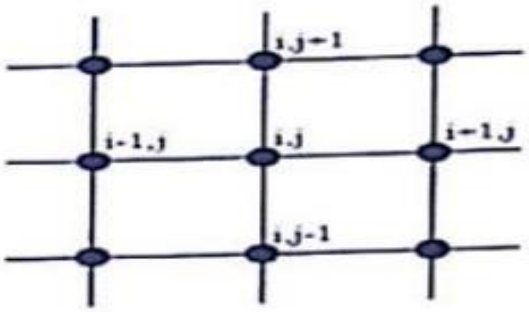
1.2.4 طريقة الحجوم المحددة (FVM):

الفكرة الأساسية لطريقة الحجوم المحددة هو تقسيم الشكل التكاملي الى العديد من الحجوم التحكمية التي تغطي مجال الاهتمام .شكل الحجم التحكمي يعتمد على طبيعة الشكل الهندسي والشكل (4−1) أدناه يبين الحجم التحكمي في (FVM).

الشكل (4−1): الشكل التحكمي في (FVM).

2.2.4 طريقة الفروق المحددة (FDM):

هو عبارة عن طريقة رياضية تطبق بوساطة متسلسلة تايلور بحيث تقوم بإيجاد مجموعة من المعادلات التفاضلية للحصول على سلسلة من المعادلات التي تصف مشتقات المتغيرات للفروق لقيم المتغير في النقاط السابقة في الفراغ أو الزمن . الشكل (4–2) يبين التقسيم والانتقال في (FDM).



الشكل (4–2): التقسيم والانتقال (FDM).

3.2.4 طريقة العناصر المحددة (FEM):

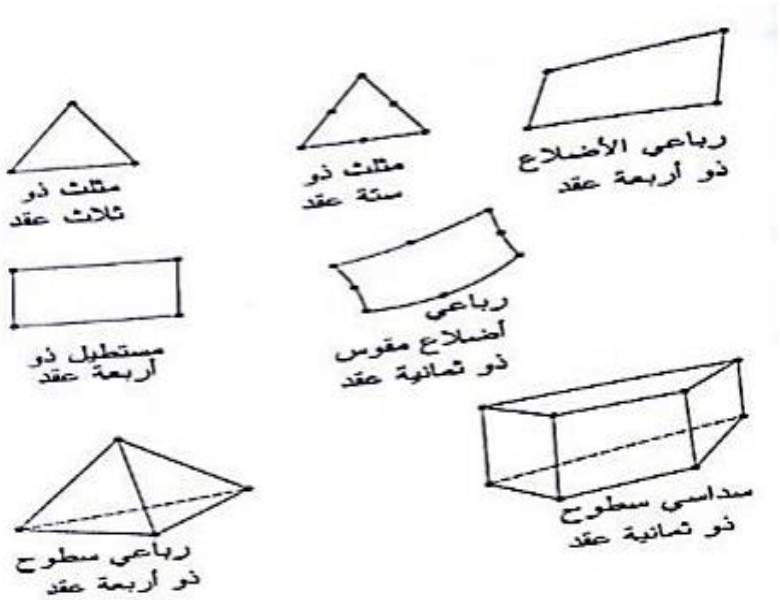
تعد طريقة العناصر المنتهية أسلوبا عدديا لحل جملة المعادلات التفاضلية العادية أو الجزئية وتعتمد على فكرة تقسيم الوسط المدروس إلى عدد من الاجزاء او العناصر (elements) ويمكن استنتاج سلوك الوسط المستمر الذي تحكمه جملة المعادلات التفاضلية الجزئية او الكلية المدروسة من التجميع المباشر للحلول العددية للأجزاء او العناصر المشكلة له. والشكل (4–3) يبين تقسيم كرة بطريقة العناصر المحددة

الشكل (4–3): تقسيم كرة بطريقة العناصر المحددة

على الرغم من أن الفكرة تعتمد عليها الطريقة (التحليل بالتجزئة ثم التركيب) قديمة نسبيا اذ استخدمها الرومان والمصريون القدماء لحل مسائل مختلفة .

1.3.2.4 مبدأ العناصر المحددة والخطوات الرئيسية :

تعتمد فكرة العناصر المنتهية (المحدودة)على تقسيم الوسط المستمر المدروس إلى أجزاء منتهية الابعاد ليمكن وصف سلوك هذه العناصر الصغيرة كل على حدة ومن ثم استنتاج سلوك الوسط المستمر وذلك عن طريق التجميع لأجزائه . ويمكن أن تطبق الطريقة على اي وسط مستمر(continuum) مثال منشأ هيكلي، او مستوي، أو حجمي، أو على وسط سائل، وأي مسألة فيزيائية قابلة للوصف عن طريق معادلات تفاضلية، وقد تم تطوير عناصر منتهية خاصة بالمسائل الخطية والمستوية والفراغية وفق ما هو مبين في الشكل (4–4)أدناه.



شكل (4–4):بعض أشكال العناصر المنتهية المستوية والفراغية.

2.3.2.4 أهم التطبيقات الحالية لطريقة العناصر المنتهية :

يمكن جعل طريقة العناصر المنتهية في الوقت الحاضر أسلوبا عاما للحل العددي لجملة المعادلات التفاضلية الخاضعة للشروط الحدية والابتدائية المناسبة ويمكن تصنيف التطبيقات الهندسية للطريقة إلى عدد من المجالات من أهمها:

١. منشآت الهندسة المدنية.

٢. الصناعات الجوية.

3.3.2.4 الافاق المستقبلية المتوقعة للطريقة :

بدأ في فترة الثمانينيات والتسعينيات من القرن الماضي تطوير طرائق هجينة بين طريقة العناصر و طرائق رياضية أخرى المنتهية التي تعالج أوساطا يمكن أن تمتد بأوساط كفراغات أو أنصاف فراغات غير منتهية كتوابع غرين (functions green) مثلا لمعالجة بعض المسائل ذات الامتدادات اللامتناهية كما في مسائل الانتشار الموجي (wave propagation problems) وقد سميت الطريقة المطورة بطريقة العناصر المحيطية وينتظر أن يتسع مثل هذا التزاوج" بين طريقة العناصر المنتهية و طرائق رياضية أخرى لتنتج طرائق "عددية حاسوبية جديدة قادرة على معالجة مسائل هندسية ذات طبيعية خاصة."

تعد طريقة الشرائح المنتهية والمستخدمة في تحليل الجسور وطريقة الفروق المنتهية على صلة بطريقة العناصر المنتهية أنهما تشتركان معها في العديد من المراحل المتخصصة ويمتاز كل منهما بمراحل مختصرة أخرى بالمقارنة مع طريقة العناصر المنتهية وذلك أنهما تختصان في حلول عددية لمسائل هندسية محددة.

4.2.4 أسباب تطور علم ديناميك الموائع الحاسوبي:

١. تطور الحواسيب حيث أصبحت ذات قدرة حسابية عالية مما أمكن إجراء ملايين من العمليات الحسابية في ثواني محدود بدقة عالية.

٢. تكلفة التجارب المعملية وصعوبتها حيث لاختبار مشكلة معمليا يجب صناعة نموذج بالمقياس الكامل وهذا يمكن تطبيق في الواقع علي عكس أدوات.(CFD) .

٣. تصميم نموذج بالمقياس الكامل واختباره والحصول على نتائج ذات دقة عالية بدون بذل الجهد والمال.

٤. المخاطر و التأثيرات البيئية الناتجة من بعض التجارب مثل اختبار غرف الاحتراق للصواريخ والمحركات الغازية.

5.2.4 المنهجية المتبعة في ديناميك الموائع الحاسوبي:

تقوم المنهجية على المرور في ثلاث مراحل أساسية:

- **مرحلة ما قبل المعالجة (Pre –processing) :**

وهي المرحلة التي يتم فيها إدخال جميع المدخلات المتعلقة بالمشكلة المعينة إلى البرنامج وتعريفها بوساطة أدوات ونوافذ الإدخال ومن ثم تحويل هذه المدخلات إلى الصورة التي تلائم المعالج وهذه المرحلة تتضمن الآتي:

١. تعريف المجال الحاسوبي(النموذج) حيث يتم رسم عن طريق برامج الرسم الحاسوبية أو إدخال إحداثيات رقميا.

٢. –إنشاء الشبكة (meshing) وهي عملية تقسيم المجال إلى نقاط كل نقطة تمثل بمعادلة جبرية يتم حلها في النقطة المعينة ودقة التحسيب، تعتمد أساسا على التقسيم (meshing) فكلما قل حجم الشبكة (تقسيم أكثر دقة) يعني ذلك الحل في نقاط أكثر وبالتالي زيادة دقة الحل لكن يكون ذلك على حساب زمن الحل ومساحة المعالج والعكس بالعكس.

٣. تعريف أو تحديد الظاهرة الفيزيائية للمشكلة حيث يتم اختيار النموذج الرياضي المناسب للحل (سريان موائع ، انتقال حرارة ، تفاعلات كيميائية، ... إلخ).

٤. تعريف خواص المادة تحت الدراسة حيث يتم اختيار النموذج الرياضي المناسب للحل.

٥. تعريف الشروط الحدية وهي الحدود المحيطة بالمجال الحاسوبي التي يكون عندها مدخل السريان أو المخرج وتساعد هذه الشروط كثيرا في تعريف ووصف المشكلة والوصول للحل.

٦. اختيار طرق الحل والتقريب والتحكم فيه وهذه الأخيرة متعلقة بطرق و أساليب الحل العددي , ويعتمد اختيارها على طبيعة المشكلة ومدى تعقيدها.

- **مرحلة المعالجة (Processing) :**

وفي المرحلة التي يتم فيها الوصول لحل لمشكلة المعينة وهذه المرحلة تتلخص في الآتي:

١. يتم تحويل المعادلات الحاكمة للسريان و انتقال الحرارة لجميع الحجوم التحكمية إلى منظومة من المعادلات الجبرية لإحدى طرق التحليل العددي وهذه العملية تكافئ تطبيق قوانين الحفظ في جميع الحجم التحكمي.

٢. يتم حل تلك المعادلات الجبرية بصورة تكرارية وهذا يرجع للطبيعة غير الخطية للمعادلات حيث يتم تحديد عدد معين للتكرار و يتوقف عنده المعالج عند الوصول إليه مع كل تكرار يتم حساب قيم لخواص المائع عند كل نقطة ولمعرفة ما إذا كان الحل هو الحل المطلوب

ويتم تحديد دقة الحل وهي عبارة عن نسبة خطأ تحسب بين كل تكرار والأخر والوصول لهذه النسبة يكون دليل الوصول للحل المطلوب وهذا ما يعرف بتقارب الحل.

- **مرحلة ما بعد المعالجة (post-processing) :**

هي المرحلة التي يتم فيها عرض وتحليل النتائج بصورة تفاعلية جاذبة وبعد تسلمها من المعالج.

6.2.4 مقارنة بين طرق ديناميك الموائع الحاسوبي والتجارب العملية:

الجدول (4-1) أدناه يبين مقارنة بين أسلوب ديناميك الموائع الحاسوبي والتجارب العملية

أسلوب ديناميك الموائع الحاسوبي(CFD)	التجارب العملية(EFD)
يمكن عمل نموذج بالمقياس الكامل	صعوبة عمل النموذج بالمقياس الكامل
يتم قياس النتائج ذاتيا بوساطة البرنامج كذلك يتم قياس عدد كبير من المتغيرات لتجربة واحدة	يحتاج لأدوات قياس لقياس المتغيرات التي قد ينتج عنها أخطاء عند قراءة النتائج كذلك محدودية المتغيرات التي يمكن قراءتها لتجربة واحدة
يمكن استخدام النموذج لمدى واسع من الاختبارات	في الأغلب يتم استخدام النموذج لعدد محدود من الاختبارات
تصميم النموذج واختباره يحتاج لوقت كبير	صناعة النموذج واختباره يحتاج لوقت طويل
غير مكلف	تكاليف عالية لإجراء التجارب

7.2.4أهداف أسلوب (CFD):

١. وضع تصاميم جديدة.(design new) .

٢. تحسين الإنتاج.

٣. اختبار وتحليل التصاميم.

٤. إعادة التصميم.(redesign) .

8.2.4 تطبيقات أسلوب (CFD):

١. مجال الفضاء.

٢. في صناعة السيارات.

٣. اختبار غرف احتراق الصواريخ والمحركات الغازية.

٤. محطات نقل القدرة.

٥. الدوائر الهيدروليكية.

٦. انظمة التكيف المركزي.

٧. المعالجات الكيميائية.

٨. علم الطب.

٩. دراسة الظواهر الطبيعية.

9.2.4 عيوب أسلوب (CFD):

نتائج محاكاة(CFD) قد تكون غير دقيقة لعدة أسباب منها:

- البيانات المدخلة قد تكون غير صحيحة.
- قد يكون النموذج الرياضي غير كاف لحل المشكلة المطروحة.
- دقة النتائج تعتمد علي إمكانيات الحاسوب المدخل.

3.4 النمذجة والمحاكاة (Modeling and Simulation):

المحاكاة الحاسوبية وضعت جنبا إلى جنب مع النمو السريع للكمبيوتر ، بعد أول انتشار له على نطاق واسع خلال مشروع مانهاتن في الحرب العالمية الثانية لنمذجة عملية تفجير نووي . وكانت محاكاة للمجالات الصعبة باستخدام خوارزمية مونتي كارلو. وكثيرا ما يستخدم جهاز محاكاة على أنه مساعد أو بديل عنها ، وهناك أنواع عديدة من المحاكاة الحاسوبية حيث أصبحت أداة مفيدة للنمذجة الرياضية للعديد من الانظمة الطبيعية في الفيزياء ، الفيزياء الفلكية ، علم المناخ ، الكيمياء ، البيولوجيا ، وكذلك النظم البشرية في الاقتصاد ، علم النفس ، علم الاجتماع ، الرعاية الصحية والهندسة .

يمكن استخدامه لاستكشاف رؤى جديدة واكتسابها في التكنولوجيا الجديدة ولتقدير أداء الأنظمة المعقدة للغاية بالنسبة للحلول التحليلية .

1.3.4 برنامج الماتلاب (Mathlab):

يعتبر برنامج الماتلاب البرنامج الأشهر في الأوساط العلمية ، إذ يستخدم هذا البرنامج في معظم المسائل العلمية والهندسية ، وبعد نمذجة أي مسألة أو ظاهرة يأتي بعدها دور هذا البرنامج ليتعامل مع تلك البرامج ويحللها بأبسط الطرق وأحدثها وأيسرها برمجة ، ومن الجدير ذكره بأن هذا البرنامج يعلم في

أكثر من ٢٠٠ معهد وكلية في الولايات المتحدة الأمريكية فقط ، عدا تلك المعاهد في أوروبا وبقية العالم.

وتعتبر لغة Matlab لغة برمجية عالية الأداء تستخدم لإجراء الحسابات التقنية ، وتقوم بعمليات الحساب والإظهار ضمن بيئة سهلة البرمجة.

وقد تم مؤخرا تطوير كمية كبيرة من الأدوات ضمن هذا البرنامج فقد تم إضافة مكاتب خاصة بنظم القدرة والطاقات المتجددة ، وأخرى لنظم الاتصالات وأنظمة التحكم الألي والأتمتة الصناعية والكثير من المكاتب والأدوات الاخرى المساعدة لمختلف التخصصات الهندسية . ويعتبر هذا البرنامج أيضا أحد أهم المقومات الاساسية للدراسة الأكاديمية والبحث العلمي ، وقد تم اعتماده ليدرس على أنه أساسية لبناء التفكير البرمجي السليم للمهندس في الكثير من الجامعات .

2.3.4 برنامج سوليد ووركس (Solid Works):

هو برنامج تصميم ميكانيكي ثلاثي الابعاد ، يعمل هذ البرنامج تحت بيئة مايكروسوفت ويندوز تم تطويره من قبل شركة (Dassault Systemes solidworks corp) إحدى شركات مجموعة داسوسيستمس في فرنسا. يستخدم سوليد ووركس حاليا أكثر من مليوني مهندس ومصمم في أكثر من (165000) شركة حول العالم . كما أن ثلاث من الجامعات الألمانية اعتمدته على أنه برنامج مقرر لطلبتها واشترت (500) نسخة تعليمية من البرنامج لتعليم طلبتها عليها كما أنه برنامج تصميم معتمد في كثير من الشركات العالمية والوكالات البحثية مثل (وكالة أبحاث الفضاء الامريكية ناسا) .

ويمتاز بسهولة النمذجة وتحريك النموذج واختباره . هذا البرنامج الاول في مجاله الذي يختص بتصميم المجسمات الهندسية ثلاثية الابعاد . يقدم حلا متكاملا لمشاهدة التصميمات الهندسية بشكل ثلاثي الابعاد وواقعي الى حد اقصى .

3.3.4 التحليل باستخدام برنامج (Ansys Fluent):

1.3.3.4 تمهيد عن تطور برنامج (Ansys Fluent):

ظهر برنامج ANSYS من شركة(Inc ANSYS.) في البداية كبرنامج متخصص في حل مسائل طريقة العناصر المنتهية(Problem Method element Finite) والتطبيقات الهندسية في ديناميكا الموائع المحوسبة وهو برنامج يستخدم في محاكاة تلك المسائل واستقرار نتائجها باستخدام الحاسب وقد اكتسبت الشركة المصنعة شهرتها الواسعة بعد إنتاجها برنامجي (ANSYS Mechanical) وبرنامج(ANSYS Metaphysics) و برامج تحوي علي أدوات تحليلية لعمليات ما قبل المعالجة للمسائل الهندسية الميكانيكية)كعمليات التصميم والرسم وبناء الهياكل الشبكية(وحل هذه المسائل ومعالجتها مرة أخري لإخراج النتائج بالشكل الأكثر تناسبا مع الواقع العملي وكل ذلك بواجهات تخاطبيه مع المستخدم(GUI) سهلة التعامل .أكثر ما تستخدم أدوات برامج(ANSYS) في تحليلها هو التحليل العددي لمسائل العناصر المنتهية التي يصعب حلها بالطرق التقليدية وذلك سواء لمسائل التحليل الديناميكي أ و الاستاتيكي أو الخطي أو غير الخطي ومسائل انتقال الحرارة وديناميك السوائل وحوسبتها وكذلك مسائل التطبيقات الكهروضوئية أو الكهرومغناطيسية .يمكن للكثير من الاختصاصات الهندسية الاستفادة من إمكانيات هذه البرمجيات مثل الهندسة الحيوية والهندسة الميكانيكية والهندسة الكهربائية وحتى الفيزياء والكيمياء .حصلت شركة ANSYS على بعض النصوص البرمجية وضمت اليها بعض الشركات التي طورت من برامجها كإضافاتها للنص البرمجي (CFD) وفي عام ٢٠٠٣ م تم تطوير قطاع ديناميكا الموائع المحوسبة وتطبيقاتها الهندسية وفي عام ٢٠٠٨ طورت شركة ANSYS منتجات شركة Soft An وهي شركة رائدة في تطوير برمجيات التصميم.

الإلكتروني عالية الأداء وأضافت اليها أدوات تدعم تطبيقات نظم الاتصالات والشبكات، بناء الدوائر المتكاملة والنظم الإلكتروميكانيكية .لقد منح هذا التطور شركة ANSYS وبرامجها أن تحتل مكانة

ملحوظة في قطاع الصناعة وقريبا في القطاع الأكاديمي لما تحقق من ربط ديناميكي بين النظم الإلكترونية والنظم الميكانيكية . أيضا يدخل هذا البرنامج في التطبيقات الطبية حيث يستخدم في اختبار تصميم المنتجات الطبية أ مثل الدعامات التي تستخدم لتبطين جدار الشريان في حال حدوث توسع وفقدان خاصية التمدد والرجوع إلى الحالة الطبيعية وأيضا يستخدم في تحليل مشاكل تضيق الشرايين التي تؤدي إلى تجلط الدم وانسداد في شرايين الدماغ مؤديا إلى السكتة الدماغية . يوفر هذا البرنامج أمكانية تعريف الجزء المراد إجراء الاختبار عليه وذلك بإدراج الإحداثيات والأبعاد سواء كانت ثنائية أم ثلاثية الأبعاد، وأيضا خصائص الدم من كثافة ولزوجة وسرعة جريان الدم والضغط، ومن ثم يتم عمل تحليل للنتائج والوصول في الحلول المناسبة ليتم تطبيقها عمليا وتفادي التأثيرات الجانبية.

2.3.3.4 أهم التطبيقات الهندسية التي يتعامل معها برنامج(ANSYS) :

١. الطائرات (Aerospace).
٢. السيارات (Automotive) .
٣. في الطب الاحيائي .(Biomedical).
٤. الجسور والابنية (Bridges & Building).
٥. الاجهزة الالكترونية (Electronic Appliance).
٦. الاجهزة الكهرو ميكانيكية الدقيقة (Micro-electric mechanical system).
٧. السلع الرياضية (Sporting Goods).
٨. الظواهر الفيزيائية (Physical Phonomena).

3.3.3.4 مراحل النمذجة باستخدام برنامج(ANSYS) :

يتم حل المشكلة أو المسألة الهندسية المعينة ببرنامج(fluent ANSYS) بعمل الخطوات التالية:

١. مرحلة(Geometry) يتم فيها رسم وتصميم النموذج الهندسي (design Mulder) كذلك تعريف جريان المائع عند دراسة المسائل المتعلقة بميكانيكا الموائع.

٢. مرحلة (mesh) ويتم فيها تقسيم الشكل الهندسي إلى خلايا (meshing) كذلك تعريف الشكل مثال (مدخل و مخرج سطح عازل.).

٣. مرحلة الضبط (setup) وتعتبر أهم مرحلة حيث يتم فيها:

- تحديد نظام الوحدات حيث يجب التأكد من تطابق وحدة قياس الطول مع الوحدة المستخدمة في مرحلة.(geometry) .
- اختيار النموذج الرياضي المناسب للتطبيق.
- تحديد المواد المكونة للنموذج حيث إن برنامج (fluent ANSYS) مزود بقاعدة بيانات تحتوي على كمية هائلة من الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمعادن و الموائع.
- إدخال البارمترات اللازمة (السرعة و درجات الحرارة ، الضغط ، شدة الاضطرابات....الخ).

٤. مرحلة الحل(solution) :

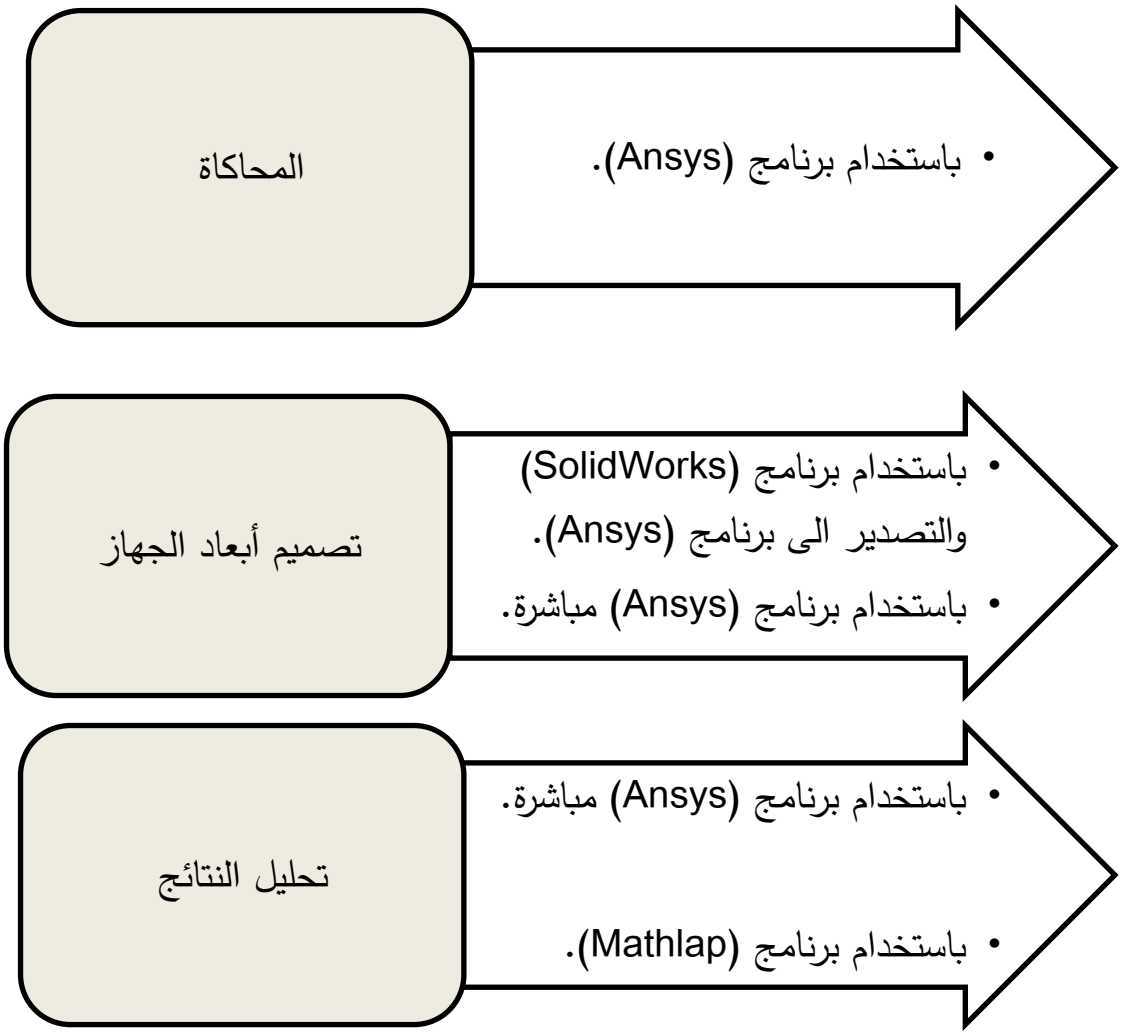
ويتم فيها إجراء الحل وذلك بعد تحديد عدد المحاولات اللازمة (iteration) ومقدار الخطأ.

٥. مرحلة النتائج (Results) :

بعد إجراء الحل يمكن عرض النتائج في عدة اشكال مختلفة) رسوم كنتورية ، مخططات . رسوم بيانية ... الخ.).

4.4 النمذجة والمحاكاة لجهاز قياس لزوجة السوائل النانوية المقترح:

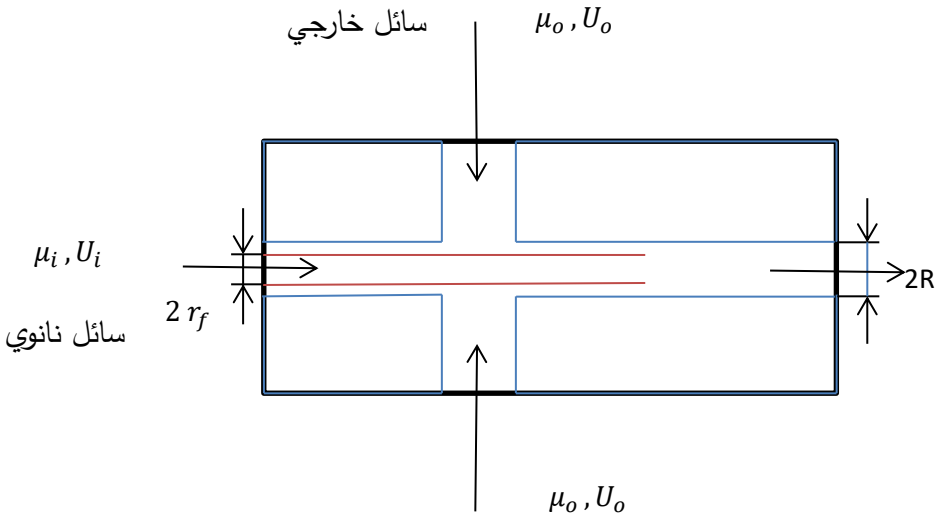
الخطوات المتبعة في النمذجة والمحاكاة للجهاز يوضحها الشكل (4-5) .



شكل (4-5):يوضح الخطوات المتبعة في النمذجة والمحاكاة.

تم القيام بمحاكاة أداء جهاز قياس لزوجة السوائل النانوية ، حيث يحتوي على أنبوب شعرية من (Teflon) بقطر داخلي (0.5 mm) كقناة رئيسية للتدفق ، بينما يتم إدخال إبرة من Stainless

(Steel) في الانبوب الخاص بتدفق المرحلة الداخلية ، القطر الخارجي (0.255 mm)، والقطر الداخلي (0.12 mm) . تم استخدام ثلاث مضخات لضخ السوائل في الجهاز الموضحة في الشكل (4-6).



الشكل (4-6) يبين جهاز قياس اللزوجة.

1.4.4المرحلة الأولى: تصميم النموذج(Model Design) :

لإجراء المحاكاة باستخدام برنامج(ANSYS) أوال علينا رسم الشكل الهندسي من مرحلة (geometry) بالأبعاد المطلوبة.

2.4.4 المرحلة الثانية: تقسيم النموذج(Meshing) :

بعد رسم الشكل الهندسي ننتقل الي مرحلة التقسيمات(mesh) و فيها يتم تحديد المداخل والمخارج وتقسيم الشكل الي أقسام صغيرة.

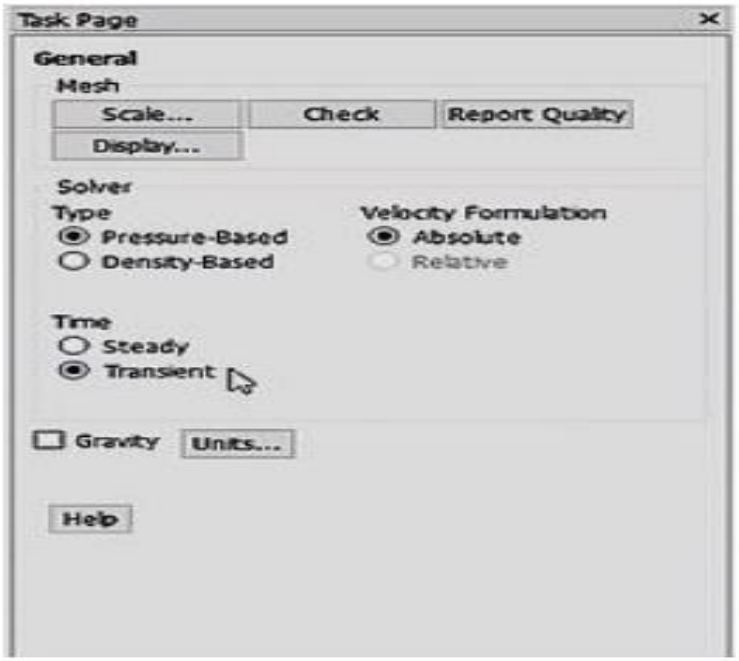
ملاحظة :

عندما يكون حجم العناصر دقيق (fine) هذا يتطلب عدد كبير من العمليات الحسابية لذلك عندما تكون النتائج المرجوة من التجربة ذات أهمية عالية يفضل تقسيم العناصر بشكل دقيق(fine) أما عندما تكون دقة النتائج غير بالغة الأهمية فيفضل اختيار حجم تقسيمات متوسطة (medium) لتقليل العمليات الحسابية في مرحلة التحليل(solution) .

3.4.4 المرحلة الثالثة: مرحلة (Setup):

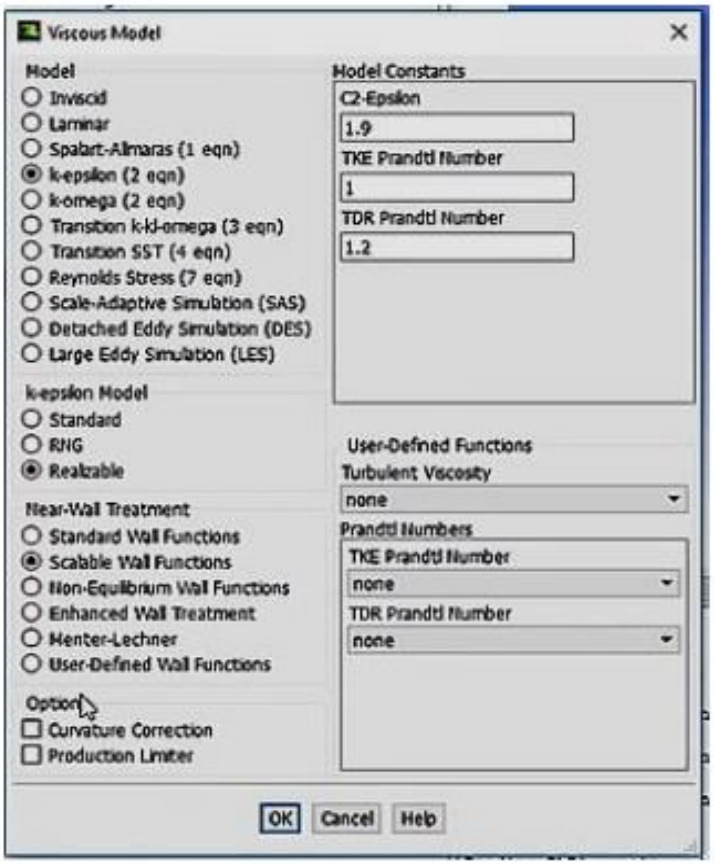
عند فتح مرحلة الضبط (setup) من تخطيط المشروع (schematic project) تظهر نافذة (setup)حيث يجب عمل عدد من الخطوات قبل الشروع في إجراء الحل وهي كالآتي:

١. من (general) كما يبينه الشكل (4-7) أدناه يتم اختيار نوع الوحدات بنظام(si) و التأكد من وحدة قياس السرعة(rpm) وأيضا التأكد من إن التغير في انتقال الحرارة مستقر (steady)كذلك النوع (type) اعتمادا على الضغط (pressure based) .



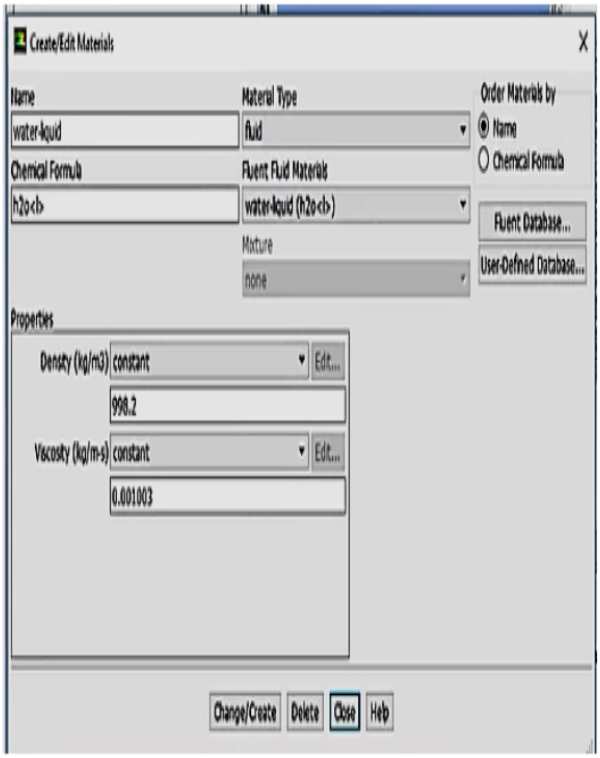
شكل (4-7) : الضبط العام (General).

٢. من (models) كما يبين الشكل (4–8) أدناه يتم تفعيل معادلة (equation viscous) كذلك تفعيل نموذج (k–ε) فالنموذج المناسب لحل مثل هذه المسائل المتعلقة بجريان السوائل وانتقال الحرارة.



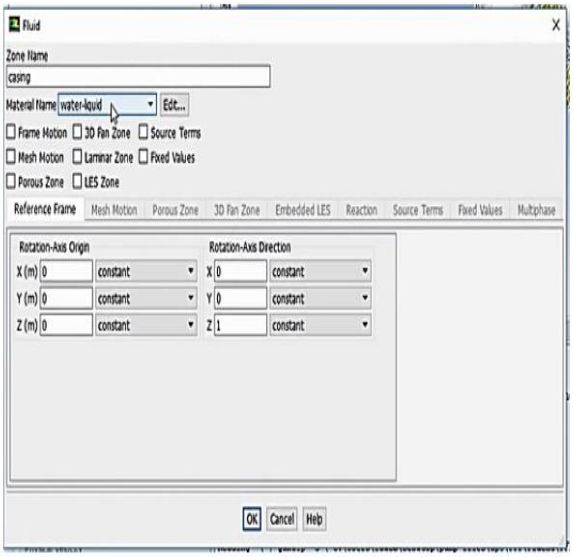
شكل (4–8) : اختيار معادلة (Viscous Equation) و نموذج(k–ε) .

٣. من (material) كما في الشكل (4-9) يتم تحميل خصائص المواد الداخلة في التجربة من (database fluent) حيث يتم تحميل المائع.(liquid- water) .



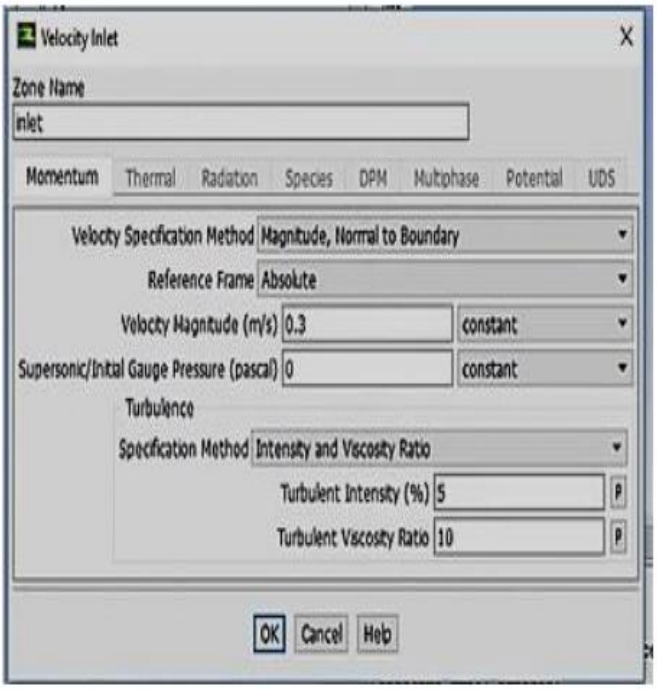
شكل (4-9) : إدخال خواص المائع المستخدم.

٤. بعد تحميل المادة السابقة ومن (condition zone cell) في الشكل (4-10) يتم تغير نوع مادة كل المناطق المعرفة مسبقا في مرحلة(geometry) حيث يتم تغير نوع المادة الجارية في الإطار الخارجي .



شكل (4–10) : تغير نوع المادة الجارية في الإطار الخارجي(Casing).

٥. بعد تحديد المواد و أسلوب الحل المناسب يتم تحديد الشروط الحدية boundary (conditions) السرعة و الضغط للمائع . كما في الشكل (4–11).



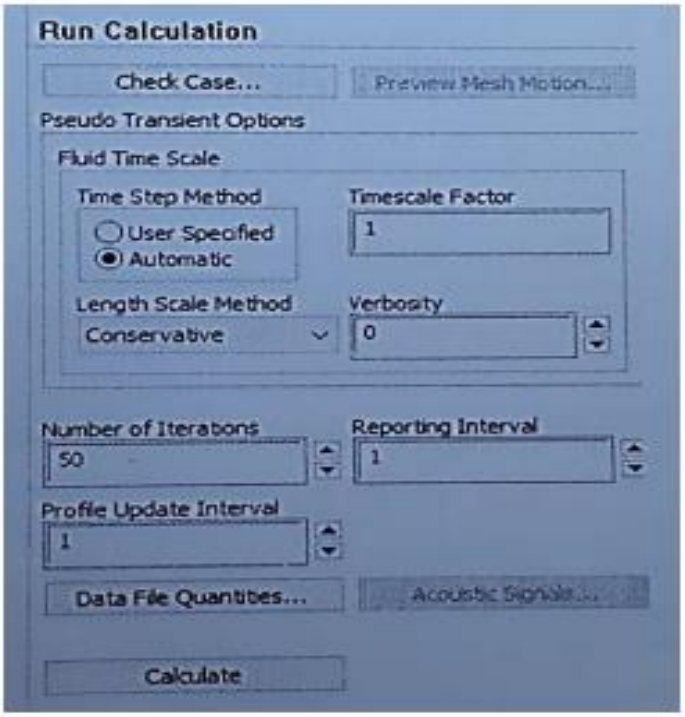
الشكل (4–11): إدخال السرعة والضغط

4.4.4 المرحلة الرابعة: مرحلة الحل (Solution) :

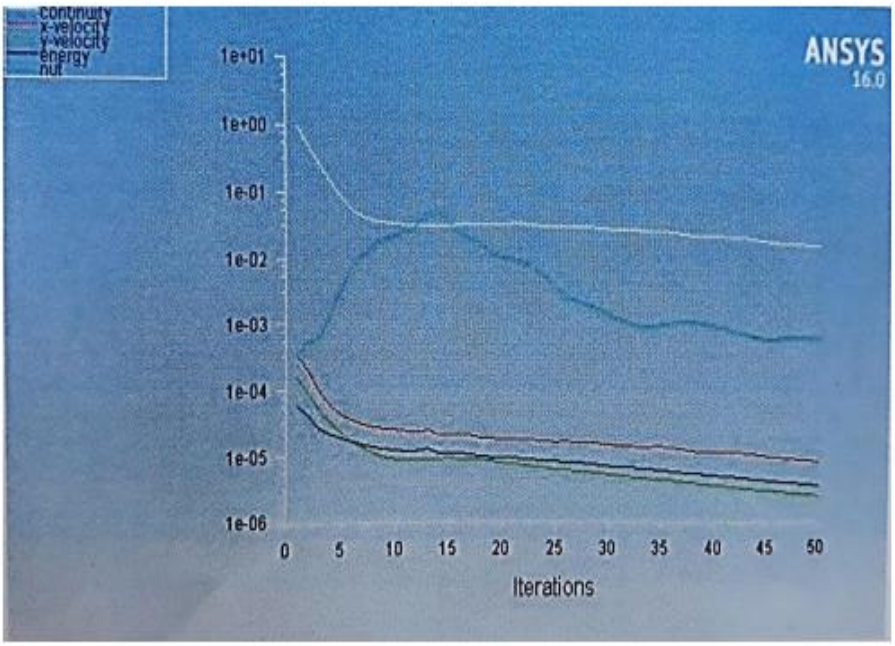
في هذه المرحلة يتم تحديد عدد المرات الازمة لإجراء الحل حيث يتم إدخال عدد (50) محاولة كما مبين في الشكل (4–12) أدناه و (200) محاولة كما في الشكل (4–14).

حيث كلما زادت عدد مرات الحل كلما زادت دقة النتائج المتحصل عليها من البرنامج.

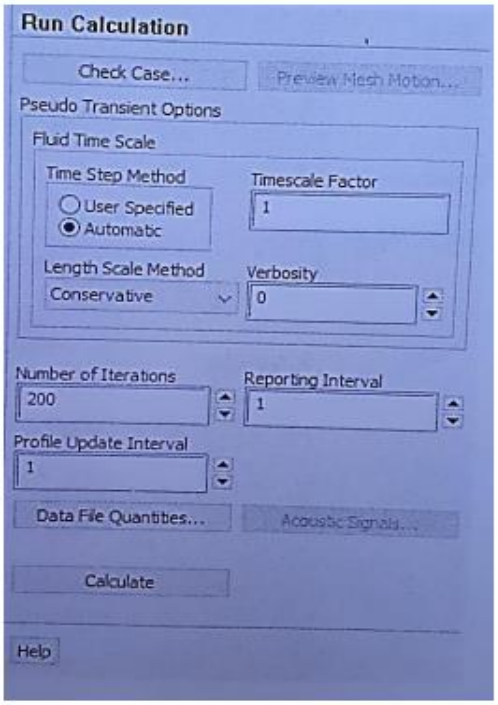
حيث يبين الشكل (4–13) عدد مرات الحل (50) مع مقدار الخطأ والشكل (4–15) عدد مرات الحل (200) مع مقدار الخطأ.



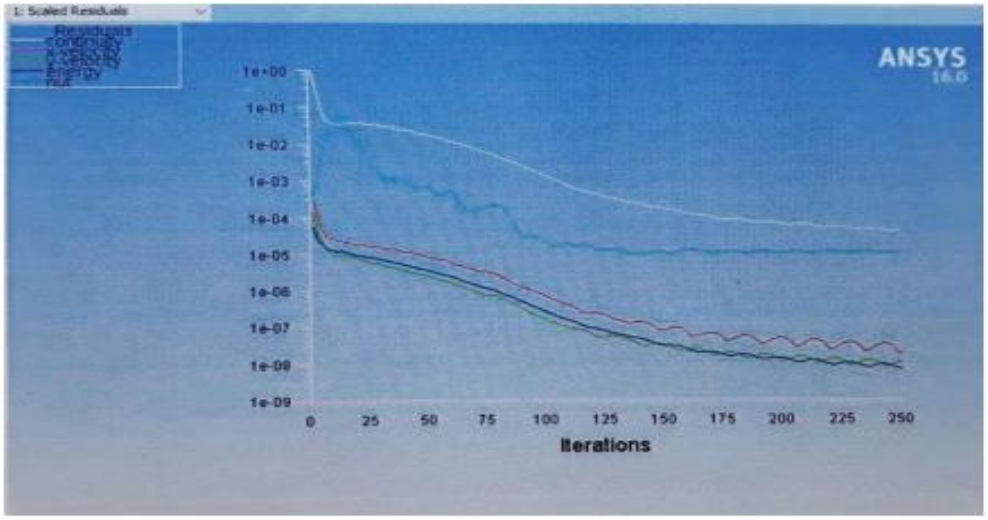
الشكل (4–12): عدد مرات الحل (50).



الشكل (4–13): الخطأ وعدد التكرارات(50).



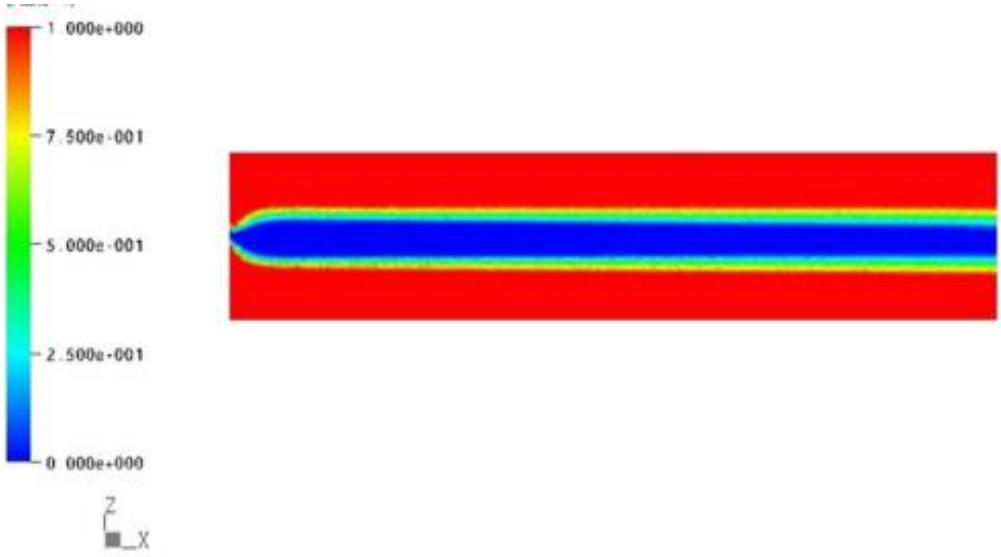
الشكل (4–14): عدد مرات الحل (200).



الشكل (4–15): الخطأ وعدد التكرارات(200).

5.4.4 المرحلة الخامسة: نتائج الحل(Results) :

يبين الشكل (4–16) نتائج المحاكاة لسائل (أوكتانول / زيت السيليكون) (octanol/silicone oil) حيث أن الأوكتانول هو السائل المتدفق في القناة الداخلية وزيت السيليكون هو المتدفق في القناة الخارجية . بافتراض أن كثافة الأوكتانول ($825\frac{kg}{m^3}$) وكثافة زيت السيليكون ($960\frac{kg}{m^3}$) وتدفق السائل في القناة الخارجية (Qo = $25ml/min$) وفي القناة الداخلية (Qi = 40m ml/min) . حيث بينت النتائج أن التدفق في القناة حلقي ولم يكن لقوة الطفو أي تأثير على التدفق .



الشكل (4–16): نتائج المحاكاة لسائل (octanol/silicone oil).

لدينا الجدول (4–2) يبين النتائج التي تم الحصول عليها لعدد من الأنظمة المستخدمة حيث يحتوي الجدول على قيم اللزوجة للسوائل المتدفقة في القناة الخارجية وقيم اللزوجة للسوائل المتدفقة في القناة الداخلية مأخوذة من تجارب سابقة وقيم اللزوجة للسوائل المتدفقة في القناة الداخلية الناتجة من محاكاة الجهاز عند قيم مختلفة للتدفقات الداخلية والخارجية .

حيث أن في النظام رقم (1) كانت النسبة بين تدفق السائل الخارجي والداخلي هي $(\frac{Q_o}{Q_i} = 0.2)$

في النظام رقم (2) كانت النسبة بين تدفق السائل الخارجي والداخلي هي $(\frac{Q_o}{Q_i} = 0.019)$

في النظام رقم (3) كانت النسبة بين تدفق السائل الخارجي والداخلي هي $(\frac{Q_o}{Q_i} = 0.45)$

في النظام رقم (4) كانت النسبة بين تدفق السائل الخارجي والداخلي هي $(\frac{Q_o}{Q_i} = 1.6)$

في النظام رقم (5) كانت النسبة بين تدفق السائل الخارجي والداخلي هي $(\frac{Q_o}{Q_i} = 0.04)$

في النظام رقم (6) كانت النسبة بين تدفق السائل الخارجي والداخلي هي $(\frac{Q_o}{Q_i} = 0.5)$

في النظام رقم (7) كانت النسبة بين تدفق السائل الخارجي والداخلي هي $(\frac{Q_o}{Q_i} = 0.98)$

الجدول(4–2) يبين النتائج التي تم الحصول عليها من عدد من الأنظمة.

رقم النظام	السائل الخارجي	السائل الداخلي	μ_o $(mpa.s)$	μ_i $(mpa.s)$	$\mu_i measured$ $(mpa.s)$
1	Silicone oil	Octanol	100	7.3	7.4
2	Silicone oil	Butyl acetate	100	0.65	0.63
3	Silicone oil	Liquid paraffin	100	20	20
4	Silicone oil	1,2–Propanediol	100	33	34
5	1,4–Butanediol	Water	55	0.86	0.89
6	1,4–Butanediol	70 wt% Phosphoric acid/water	55	12.3	12.8
7	1,4–Butanediol	85 wt% Phosphoric acid/water	55	42	40

لدينا أيضا الجدول (4–3) هو الجدول (4–2) مضافا إليه القيم التي تم حسابها باستخدام العلاقة (3 – 65) التي تم استنتاجها سابقا.

الجدول(4–3) يبين النتائج التي تم الحصول عليها من عدد من الأنظمة مع القيم المحسوبة.

رقم النظام	السائل الخارجي	السائل الداخلي	μ_o $(mpa.s)$	μ_i $(mpa.s)$	$\mu_i measured$ $(mpa.s)$	$\mu_i calculated$ $(mpa.s)$
1	Silicone oil	Octanol	100	7.3	7.4	7.3
2	Silicone oil	Butyl acetate	100	0.65	0.63	0.62
3	Silicone oil	Liquid paraffin	100	20	20	19.58
4	Silicone oil	1,2–Propanediol	100	33	34	31.8
5	1,4–Butanediol	Water	55	0.86	0.89	0.73
6	1,4–Butanediol	70 wt% Phosphoric acid/water	55	12.3	12.8	12.44
7	1,4–Butanediol	85 wt% Phosphoric acid/water	55	42	40	39.48

5.4 تحليل النتائج:

٣. تم تطوير أبعاد الجهاز مع المحافظة على النسبة بين القطر الداخلي والقطر الخارجي ولكن تم تغير القطر الداخلي ليلائم السوائل النانوية حيث أصبحت الأبعاد الجديدة (القطر الخارجي (0.255 mm)، والقطر الداخلي (0.12 mm)).

٤. تقارب بين النتائج التجريبية والنتائج التي تم حسابها من خلال العلاقة المستنتجة والنتائج الناتجة من المحاكاة.

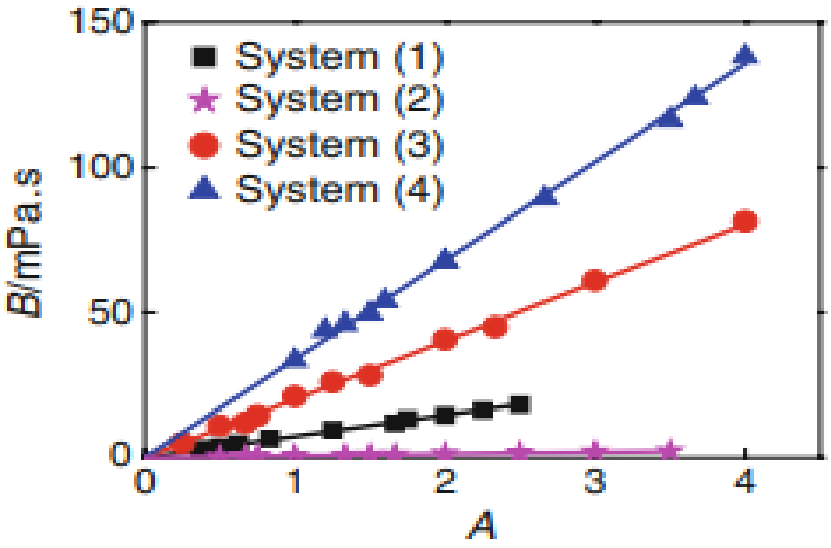
٥. نلاحظ من النتائج أنه كلما زاد تركيز الجسيمات النانوية كلما زادت اللزوجة وهذا ما تم استنتاجه من خلال النظامين (6 و7) في الجدول (4–2) .

٦. عندما يكون السائل الاساسي للسائل النانوي ذا لزوجة منخفضة تكون لزوجة السائل النانوي منخفضة هذا ما تم استنتاجه من خلال النظام (5) في الجدول (4–2) .

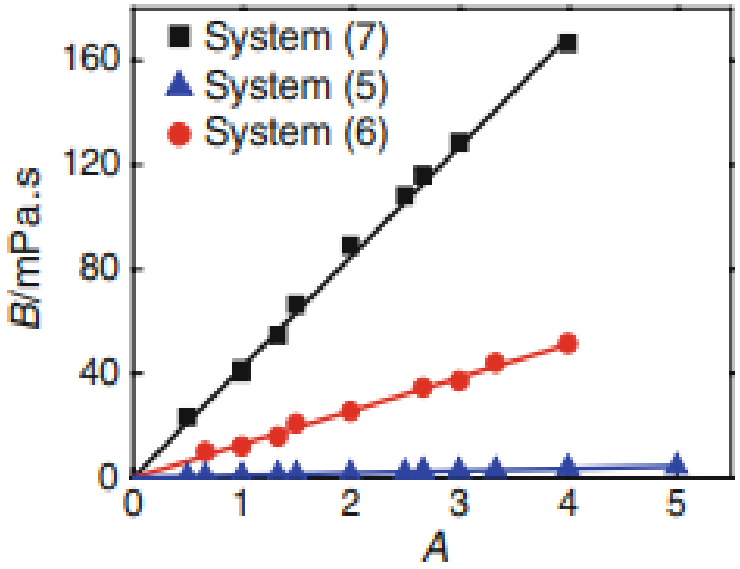
٧. كلما زاد تدفق السائل الخارجي كلما زادت اللزوجة وهذا ما تم استنتاجه من الجدول (4–2).

٨. كلما زاد التدفق كلما زادت السرعة كلما قل الضغط حسب مبدأ برنولي ومن خلال النتائج السابقة في الجدول (4–2) نستنتج أنه كلما زاد الضغط كلما زادت اللزوجة.

من خلال تحليل النتائج باستخدام برنامج (Mathlap) حصلنا على الشكل (4–17) والشكل (4–18) :



الشكل (4–17): تحليل نتائج الانظمة (1,2,3,4).



الشكل (4–18): تحليل نتائج الانظمة (7,5,6).

6.4 التوصيات:

٤. إمكانية تصميم هذا الجهاز وحساب الإجهادات المؤثرة ، وسماكة المعدن ، والبنية.

٥. ربط الجهاز مع أجهزة قياس للسرعة والتدفقات.

٦. تطوير مجال قياس لزوجة السوائل النانوية في الجهاز.

٧. دراسة العوامل المؤثرة على تكتل الجسيمات والعمل على الحد منها.

٨. إمكانية قياس اللزوجة عند درجات حرارة وضغوط مرتفعة.

٩. دراسة تأثير التدفقات المرتفعة على قياس اللزوجة.

قائمة المصادر والمراجع :

١. المراجع العربية :

[١] محمد شريف الاسكندراني – تكنولوجيا النانو من أجل غداً أفضل – يناير 1978م .

[٢] عمر بن عبدالله الهزازي– اللزوجة وقياسها وتطبيقاتها – الطبعة الأولى 2010م .

٢. المراجع الأجنبية :

1. B. Aladag, S. Halelfad, N. Doner, Th. Maré, S. Duret, P. Estellé, Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures, Appl. Energy 97 (2012) 876–880.

2. L. Syam Sundar, E. Venkata Ramana, Manoj K. Singh, Antonio C.M. Sousa, Thermal conductivity and viscosity of stabilized ethylene glycol and water mixture Al2O3 nanofluids for heat transfer applications: an experimental study, Int. Commun. Heat Mass Transfer 56 (2014) 86–95.

3. G. Zyła, J. Grzywa, A. Witek, M. Cholewa, Influence of anisotropic pressure on viscosity and electrorheology of diethylene glycol-based MgAl2O4 nanofluids, Nanoscale Res. Lett. 9 (2014) 170

4. H. Li, L. Wang, Y. He, Y. Hu, J. Zhu, B. Jiang, Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of ethylene glycol based ZnO nanofluids, Appl. Therm.Eng. 10 (071) (2014).

5. W. J. Lan , S. W. Li ,J. H. Xu , G. S. Luo, Rapid measurement of fluid viscosity using co-flowing in a co-axial microfluidic device, Microfluid Nanofluid (2010) 8:687–693.

6. D D Liyanage1, Rajika J K A Thamali1, A A K Kumbalatara1, J A Weliwita2, S Witharana1,3 *,An Analysis of Nanoparticle Settling Times in Liquids.

7. N Masoumi, N Sohrabi and A Behzadmehr1, A new model for calculating the effective viscosity of nanofluids, 2009 J. Phys. D: Appl. Phys. 42 055501.

8. Liudmila A. Pozhar, Structure and dynamics of nanofluids: Theory and simulations to calculate viscosity, Department of Chemical and Process

Engineering, University of Surrey, Guildford, Surrey, United Kingdom and Institute for Electromagnetic Research, Kharkov, Ukrai~Received 28 June 1999!

9. Tseng WJ, Wu CH. Aggregation, rheology and electrophoretic packing structure of aqueous Al2O3 nanoparticle suspensions. Acta Mat 2002;50:3757–66.

10. Phuoc TX, Massoudi M, Chen RH. Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan. Int J Ther Sci 2011;50:12–8.

11. Dutta and H. Hofmann "Nanomaterials", Electronic Book. (2005).

12. -A. Pantano. “Carbon nanotube - Polymer Composites and their applications”. Chapter of the book “Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties and Applications”, Applied Science Innovations Pvt. Ltd., in press 2008.

13. R. Saleh, N. Putra, S. Purbo Prakoso, W. Nata Septiadi, Experimental investigation of thermal conductivity and heat pipe thermal performance of ZnO nanofluids, Int. J. Therm. Sci. 63 (2013) 125–132.

14.I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina, Investigation of viscosity of R123–TiO2 nanorefrigerant, Int. J. Mech. Mater. Eng. 7 (2012) 146–151.

15.I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina, Latest developments on the viscosity of nanofluids, Int. J. Heat Mass Transf. 55 (2012) 874–885.

16.W. Yu, S. Choi, The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Hamilton–Crosser model, J. Nanopart. Res. 6 (4) (2004) 355–361.

17.H. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, J. Chem. Phys. 20 (1952) 571.

18.E.V. Timofeeva, A.N. Gavrilov, J.M. McCloskey, Y.V. Tolmachev, S. Sprunt, L.M. Lopatina, J.V. Selinger, Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: experiment and theory, Phys. Rev. E 76 (6) (2007) 061203.

19.Leong KC, Yang C, Murshed SMS. A model for the thermal conductivity of nanofluids– the effect of interfacial layer. Journal of Nanoparticle Research 2006; 8:245–254.

20. Wang B, Wang X, Lou W, Hao J. Rheological and Tribological Properties of Ionic Liquid-Based Nanofluids Containing Functionalized Multi-Walled Carbon Nanotubes. Journal of Physical Chemistry C 2010;114:8749-8754.

21. G. Ramesh, N. Prabhu, Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment, Nanoscale Res. Lett. 6 (1) (2011) 334.

22. H. Zhu, C. Zhang, S. Liu, Y. Tang, Y. Yin, Effects of nanoparticle clustering and alignment on thermal conductivities of Fe3O4 aqueous nanofluids, Appl. Phys. Lett. 89 (2) (2006) 023123.

23. C.H. Li, G. Peterson, The effect of particle size on the effective thermal conductivity of AlO–water nanofluids, J. Appl. Phys. 101 (4) (2007) 044312.

24. A. Martin, M.M. Bou-Ali, Determination of thermal diffusion coefficient of nanofluid: fullerene–toluene, CR Méc. 339 (5) (2011) 329–334.