وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة ميسان
كلية التربية الأساسية
قسم العلوم العامة

نمذجة مضخة صوتية للموائع الدقيقة باستخدام برنامج محاكاة متعدد الفيزياء

بحث تخرج مقدم كلية التربية الأساسية قسم العلوم العامة

كجزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في العلوم العامة (فرع الفيزياء)

تقدمت به الطالبتان

زهراء احمد عبد الله

امنة يحيى عبود

بإشراف

أ.م.د. عدي علي الجراح

1447هـ **2026م**

بِسْمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحْمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

﴿وَمَا أُوتِيتُم مِّنَ الْعِلْمِ إِلَّا قَلِيلًا﴾

صَدَقَ ٱللَّهُ ٱلْعَلِيُّ ٱلْعَظِيمُ

سورة الإسراء (اية ٨٥)

الاهداء

إلى الوعد الإلهي الذي تتطلع إليه الإنسانية جمعاء، إلى من سيشرق بظهوره فجر العدالة، ويعيد للحق ميزانه، إلى صاحب العصر والزمان، الإمام المهدي المنتظر (عجّل الله تعالى فرجه الشريف)...

نهدي هذا العمل العلمي المتواضع، الذي سعينا من خلاله إلى الإسهام، ولو بقدر يسير، في مسيرة العلم والمعرفة، تلك المسيرة التي تُعدّ أساسًا في بناء الإنسان الواعي والمجتمع القادر على إدراك الحق والسير في طريقه.

وإذ نغوص في عوالم العلم، ونبحث في دقائق الظواهر الفيزيائية، نستشعر عظمة هذا الكون ودقة نظامه، فنزداد يقينًا بأن هذا الانتظام البديع إنما هو مقدمة لظهور العدالة الإلهية الكبرى التي ستتحقق على يديك المباركتين.

يا صاحب الزمان، إن هذا الجهد ما هو إلا خطوة متواضعة، نرجو أن تُكتب ضمن الأعمال التي تُقرّبنا إلى نهجك، وأن تجعلنا من الساعين إلى العلم، العاملين به، الممهّدين لظهورك الشريف.

اللهم اجعلنا من أنصاره وأعوانه، ووفّقنا لنكون من أهل الحق الثابتين عليه، وارزقنا شرف لقائه، والسير تحت رايته؛ إنك سميع مجيب..

الشكر والتقدير

الحمدُ للهِ الذي أودع في هذا الكون نظامًا دقيقًا تحكمه قوانين محكمة، وجعل لكلِّ ظاهرةٍ سببًا، ولكلِّ سعيٍ نتيجة، القائلِ في كتابه الكريم: ﴿لَئِن شَكَرْتُمْ لَأَزِيدَنَّكُمْ﴾، نحمدُه سبحانه على ما أفاض به علينا من نعمٍ ظاهرةٍ وباطنة، وعلى ما منّ به من توفيقٍ كان العاملَ الأساس في إنجاز هذا العمل.

وانطلاقًا من قول النبي محمد صلى الله عليه وآله وسلم: "من لم يشكرِ المخلوقَ لم يشكرِ الخالق"، نتقدّم بأسمى معاني الشكر إلى سيد الخلق محمد صلى الله عليه وآله وسلم، وإلى أهل بيته الطيبين الطاهرين، الذين كانوا بمثابة المصدر النقي للطاقة المعرفية التي أنارت دروب العلم، ومهدت مسارات الفكر الإنساني نحو التكامل والاتزان.

كما نتوجّه بالشكر والتقدير إلى المصلحين الذين يسعون إلى إعادة توازن المجتمع، تمامًا كما تعمل الأنظمة الفيزيائية على استعادة حالة الاستقرار، وإلى شهدائنا الأبرار الذين مثّلوا أقصى درجات التضحية، فكان عطاؤهم أشبه بطاقةٍ لا تفنى، بل تتحوّل إلى دافعٍ مستمر لبناء الوطن وصون كرامته.

ونخصّ بالشكر أهلنا الكرام، الذين كانوا بمثابة القوة الداعمة التي دفعتنا للاستمرار، فكان لوقوفهم إلى جانبنا الأثر الكبير في تجاوز التحديات وتحقيق هذا الإنجاز.

كما نتقدّم بخالص الشكر والتقدير إلى (أ.م.د. عدي علي صبيح الجراح) مشرف بحثنا، لما قدّمه من توجيهات علمية دقيقة، أسهمت في ضبط مسار هذا العمل كما تُضبط المعادلات للوصول إلى نتائج صحيحة، وكان لإرشاداته الدور الحاسم في إخراج البحث بصورة متكاملة.

ولا يفوتنا أن نتقدّم بالشكر إلى جميع التدريسيين الأفاضل في كلية التربية الأساسية، الذين كانوا مصدرًا للمعرفة وأساسًا لبناء الفهم العلمي، وأسهموا في ترسيخ المبادئ التي يقوم عليها التفكير العلمي المنهجي.

المحتويات

الموضوع	الصفحة
الفصل الأول (المقدمة)	
1.1المقدمة	1
2.1 تاريخ المضخات	1
3.1 تاريخ المحاكاة الحاسوبية	4
4.1 تاريخ برنامج متعدد الفيزياء	5
5.1 الدراسات السابقة	5
6.1 الهدف من البحث	7
الفصل الثاني (الجزء النظري)	
1.2 المقدمة	8
2.2 الموائع	8
3.2 انواع الموائع	9
1.3.2 الموائع النيوتنية وغير النيوتنية	9
2.3.2 الموائع القابلة للانضغاط وغير قابلة للانضغاط	9
3.3.2 المائع المثالي	10
4.2 جريان الموائع	10
5.2 انواع جريان الموائع	11
1.5.2 الجريان اللزج و الجريان غير اللزج	11
2.5.2 الجريان الداخلي والجريان الخارجي	12
3.5.2 الجريان القابل للانضغاط والجريان غير القابل للانضغاط	12
4.5.2 الجريان الصفائحي والجريان المضطرب	12
5.5.2 الجريان الطبيعي (غير القسري) والجريان القسري	13
6.5.2 الجريان المستقر والجريان غير المستقر	13
7.5.2 الجريان أحادي وثنائي وثلاثي الأبعاد	14
6.2 معادلات جريان الموائع	14
1.6.2 معادلة الاستمرارية	14

2.6.2 معادلة برنولي	15
7.2 مضخات الموائع	16
8.2 انواع مضخات الموائع	16
1.8.2 المضخات الديناميكية	16
2.8.2 مضخات الإزاحة الموجبة	17
3.8.2 المضخات الدقيقة	18
9.2 الماء وخصائصه	20
1.9.2 خصائص الماء البيولوجية	20
2.9.2 خصائص الماء الكيميائية	22
3.9.2 خصائص الماء الفيزيائية	23
10.2 المحاكاة (النمذجة) الحاسوبية	24
11.2 انواع المحاكاة الحاسوبية	25
1.11.2 المحاكاة باستخدام طريقة العناصر المحددة	25
2.11.2 المحاكاة المستمرة	26
3.11.2 محاكاة الأحداث المنفصلة	26
4.11.2 محاكاة مونت كارلو	27
5.11.2 المحاكاة القائمة على الوكلاء	27
6.11.2 المحاكاة الديناميكية	28
7.11.2 محاكاة الفيزياء متعددة المجالات	28
الفصل الثالث (الجزء العملي)	
1.3 المقدمة	31
2.3 الية الوصول الى الواجهة الأساسية لبرنامج كومسول	31
3.3 طريقة اجراء محاكاة المضخة الصوتية للموائع الدقيقة	34
4.3 النتائج والمناقشة	40
5.3 مقترحات للدراسات المستقبلية	44
المصادر	45

الخلاصة

يهدف هذا البحث إلى إبراز كفاءة المضخات الصوتية وإمكاناتها التطبيقية ضمن أنظمة الموائع الدقيقة، خاصة في التطبيقات التي تتطلب دقة عالية وتحكماً مستمراً بالجريان، مثل التطبيقات الطبية والحيوية. حيث تم تصميم ودراسة مضخة صوتية في أنظمة موائع دقيقة توضح سلوك الجريان الناتج عن تأثيرات الاهتزازات الصوتية داخل القنوات الميكروية الدقيقة، وذلك من خلال محاكاة فيزيائية باستخدام برنامج المحاكاة (COMSOL). اذ يمكن بيان كيفية توليد فرق ضغط يساهم في إحداث الضخ للمائع ومن ثم التحكم باتجاه وسرعة جريان المائع من خلال تحليل آلية انتقال المائع تحت تأثير هذه الاهتزازات الصوتية. اذ تم تحليل سلوك ماء محصور بضغط جوي قياسي داخل قناة انبوبية مغلقة مستطيلة الشكل تحتوي على 13 نتوء موزعة بشكل متعاقب في اعلى واسفل القناة السفلية من الانبوب مهتزة بتردد مقداره (2MHz) مائل بزاوية مقدارها حوالي (45^0) مع المحور السيني. وقد اظهرت نتائج توزيع الضغوط داخل الأنبوب المدروس وجود مناطق تضاغط مائلة باغلب مناطقها بزاوية ميل مقدارها (45^0) تقابلها مناطق تخلخل مائلة ايضاً بنفس الزاوية وموزعة على طول جميع اجزاء الانبوب بشكل متناوب. وقد سجلت اعظم قيمة للضغط بحدود ($4.5x10^5Pa$)، اما اصغر قيمة فكانت بحدود ($-4.5x10^5Pa$). كما لوحظ ايضاً أن مساحة مناطق التضاغط تقارب مساحة مناطق التخلخل، مما يشير إلى أن محصلة التغير في الضغط داخل النظام تساوي صفراً. من جهة اخرى، اظهرت نتائج توزيع القوة لوحدة الحجم عند اركان احد النتوءات داخل القناة السفلية ان القيمة العظمى للقوة لوحدة الحجم قد بلغت ($5\times10^9N/m^3$) عند أطراف النتوءات، مما يدل على أن هذه المناطق تمثل المصدر الرئيسي لتوليد القوة المؤثرة على الجريان داخل القناة. اضافة الى ذلك، اظهرت نتائج توزيع سرع جريان الماء داخل الجزء الايمن والعلوي والايسر من الانبوب أن سرع الجريان تبلغ قيمتها العظمى في وسط القناة، حيث تصل إلى (0.7mm/s)، في حين تنخفض عند المناطق المحاذية للجدران لتصل إلى قيمتها الصغرى البالغة ($8.5x10^{-7}mm/s$). وتم ملاحظة حدوث انخفاض نسبي لسرعة الجريان عند اركان الانبوب ذات الاقطار الاكبر داخل الأنبوب مقارنة ببقية الاجزاء. اما عند الجزء السفلي من الانبوب، فلوحظ وجود مناطق متناوبة من السرع العالية والمنخفضة، بقيمة عظمى مقدارها (55.4mm/s) وقيمة صغرى مماثلة للقيم الصغرى عند المناطق المحاذية للجدران. وقد اظهرت النتائج إلى أن تاثيرات الاهتزازات الصوتية قادرة على توليد تدفق مستقر داخل القنوات الدقيقة للموائع (الميكروفلويدية). وقد اعطيت التفسيرات الملائمة للنتائج المستحصلة، كما وقد وضعت بعض المقترحات لابحاث مستقبلية متعلقة بهذا الموضوع.

الفصل الاول

المقدمة

1.1 المقدمة

في هذا الفصل، سوف يتم دراسة تاريخ المضخات، التي تعتبر احد أهم الاكتشافات البشرية منذ العصور القديمة، ولا يزال التطور في هذا المجال مستمراً، حيث أصبحت المضخات من ضروريات الحياة البشرية. بالإضافة إلى ذلك، سوف يتم دراسة تاريخ المحاكاة (النمذجة) الحاسوبية، والتطورات التي طرأت عليها، ثم بعدها معرفة تاريخ برنامج كومسل متعددة الفيزياء، الذي يعد عملية انتقال كبيرة في برامج المحاكاة. بعد ذلك سيتم التطرق إلى دراسات سابقة متعلقة بموضوع البحث، ثم المرور على اهمية والهدف من هذه الدراسة.

2.1 تاريخ المضخات

لا يمكن لاي شيء أن ينافس المضخة على لقب أقدم اختراع لتحويل الطاقة الطبيعية إلى عمل مفيد. ولعل الأمر الأكثر أهمية هو أنه، على الرغمِ من التطورات التكنولوجية التي حدثت منذ العصور القديمة، بما في ذلك تحويل الطاقة الكامنة في الماء الى أشكال أخرى من الطاقة وصولاً إلى الانشطارِ النووي، فإن المضخةَ لا تزال على الأرجح ثاني أكثرِ الآلات استخداماً بعد المحرك الكهربائي[1] .

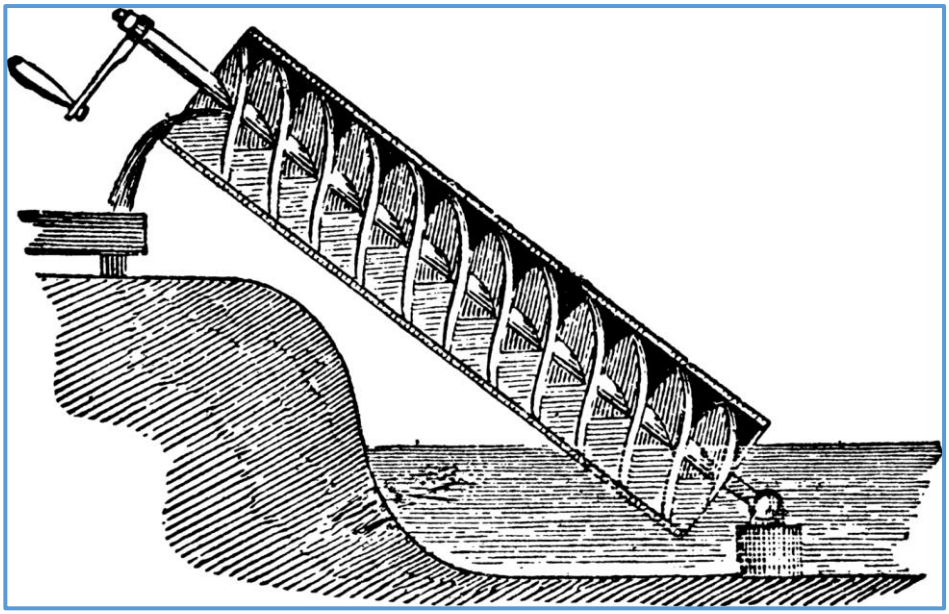
في العديد من الحضارات القديمة، استخدم الشادوف (او المنزفة) كاقدم جهاز لرفع مياه الري من اماكن منخفضة نسبياً، كالآبار او الانهار، الى اماكن اكثر ارتفاعاً. وهو عبارة عن أداة خشبية يدوية تتكون من عمود خشبي طويل، مثبت على شكل أرجوحة، يحتوي على حاوية (كيس او دلو) مثبت بحبل في أحد أطراف العمود، مع ثقل موزون في الطرف الآخر، كما موضح في الشكل (1-1). يقوم المشغل بسحب الحبل المتصل بالطرف الطويل من الارجوحة فيملأ الحاوية، ويسمح الثقل الموزون برفع الحاوية الممتلئة. في بعض الأحيان، كانت تُركب سلسلة من الشواديف لصنع نظام متعدد المستويات لرفع المياه الى مستويات اكثر ارتفاعاً[2].

الشكل (1-1): الشادوف (المنزفة) المستخدم لرفع مياه الري من الاماكن المنخفضة[2].

وجدت اول ادلة على استخدام الشادوف في التاريخ في بلاد ما بين النهرين وذلك في احد الاختام الاسطوانية التي تعود الى حقبة الملك سرجون الاكدي (حوالي عام 2200 ق.م). بعد ذلك وجدت آثار فرعونية تدل على وصوله الى صعيد مصر في الفترة حوالي 2000 ق.م. سمح هذا الجهاز بري المحاصيل بالقرب من ضفاف الأنهار والقنوات خلال فترات الجفاف[2].

بعد ذلك تم اختراع لولب أرخميدس (Archimedes' Screw) على يد عالم الرياضيات اليوناني أرخميدس (حوالي 200 ق.م)، الموضح في الشكل (1-2)، ويعتبر لولب أرخميدس أحد أقدم الإنجازات الهندسية التي لا تزال تستخدم حتى اليوم. وتشير إحدى النظريات حول ابتكاره إلى أن ملك مصر طلب من أرخميدس ابتكار طريقة لإزالة المياه من سفنه، بينما تشير نظرية أخرى إلى أن الجهاز صمم قبل زمن أرخميدس بمئات السنين، وأنّه قام بتعديل تصميمه فقط[3].

يتكون لولب أرخميدس من عمود خشبي ذو انحناءات مصنوعة من أغصان الصفصاف أو الخوص الرقيق والمرن، واحدة فوق الآخرى، بحيث يتم إنشاء اللولب الذي يدور داخل أنبوب خشبي. يغمر الطرف السفلي للجهاز داخل الماء بميل نموذجي يبلغ 30 درجة، ومن خلال تدوير اللولب يتم رفع الماء المحصور داخل اللفائف نحو الطرف العلوي للأنبوب. ويُعد لولب أرخميدس أول أنواع المضخات المعروفة باسم مضخات الإزاحة الموجبة والتي تعمل بمبدأ نقل الموائع عن طريق حبس حجم ثابت منها ثم دفعه (إزاحته) إلى أنبوب التفريغ[2].



الشكل (1-2): مخطط يوضح تصميم لولب أرخميدس بناء على الوصف المذكور في احدى نسخ كتاب دي أركيتيكتورا للمعماري ماركوس فيترفيوس تعود لعام 1390م[2].

اخترع المهندس كتيسيبيوس (Ctesibius) الإسكندري (حوالي 285–222 ق.م) آلية رفع أخرى، وهي المضخات ذات المكبس او ما تسمى باسم مضخات القوة (Force Pumps). تتكون هذه المضخة من أسطوانتين بمكابس، يتم تحريكها بواسطة قضبان توصيل متصلة بنهايتين متقابلتين للرافعة الواحدة. استُخدمت هذه المضخة في العديد من التطبيقات، مثل ضخ المياه من الآبار، وضخ مياه الصرف الصحي، وضخ المياه من الأقبية، وفي مجالات اخرى كالتعدين، وإطفاء الحرائق، وفي السفن والقوارب[2].

اضافة الى ذلك، تم تطوير بعض النماذج الاولية من الطواحين الهوائية المستخدمة لطحن الحبوب وذلك بجعلها مضخات لرفع المياه. وأقدم تصميم معروف هو نظام المحور الرأسي الذي طُور في بلاد فارس حوالي 500–900 ق.م[2].

في نهاية القرن الثامن عشر، تحقق إنجاز كبير عندما اخترع جيمس وات (James Watt) المحرك البخاري والذي تم تسخيره فيما بعد في صناعة المضخات. وفي القرن التاسع عشر، شكّل إنتاج المحركات الحرارية والكهربائية، والتطور السريع للصناعة، والنمو السكاني في المدن، مشاكل كان حلها مستحيلاً دون استخدام المضخات. في ذلك الوقت، أصبحت صناعة المضخات صناعة مهمة، زادت قيمتها مع مرور الوقت، حيث سعت باستمرار إلى إيجاد طرق لتحسين أداء المضخات وجعل هذه

الأجهزة أكثر موثوقية وكفاءة واقتصادية. في الوقت الحاضر، تفتح مضخات المكابس، وأجهزة الطرد المركزي، وحتى مضخات التفريغ، آفاقاً جديدة في استغلال وإدارة موارد المياه[2].

3.1 تاريخ المحاكاة الحاسوبية

ارتبط نمو برامج محاكاة الأحداث المنفصلة (Discrete-Event Simulation) ارتباطاً وثيقاً بنمو تقنيات الحوسبة. فمع تطور الأجهزة والبرمجيات، تطورت أيضاً برامج المحاكاة الحاسوبية. وقد شهدت اربعينيات القرن الماضي أول تطبيق عملي لمحاكاة الحاسوب. بعد ذلك ظهرت بدايات لغات البرمجة والتي اثمرت عام 1957 عن ابتكار لغة فورتران FORTRAN. كما برزت بعد ذلك في الستينيات بدايات برامج المحاكاة البسيطة بشكل ملحوظ، اذ ظهرت لغات المحاكاة المتخصصة مثل برنامج جبس (GPSS) في سنة 1961 و سيميولا (SIMULA) في عام 1974[4].

لقد كانت برامج المحاكاة المبكرة عبارة عن أسطر من التعليمات البرمجية تُكتب باستخدام لغات البرمجة العامة مثل لغة فورتران، وكانت تُعد بمثابة صندوق أسود تدخل إليه البيانات وتُستخرج النتائج بعد تشغيل المحاكاة[4].

في السبعينيات، استمرت تكنولوجيا الحاسوب في التقدّم مع ظهور المعالجات الدقيقة والحاسوب الشخصي (Personal Computer PC). وقد نشر هورونز عام 1976 كتابه الذي أوضح إمكانات عمليات المحاكاة المرئية والتفاعلية، مما أدّى إلى ظهور لغة المحاكاة المرئية (VIS) عام 1979. وفي الثمانينيات والتسعينيات، شهدت المحاكاة تطوراً ملحوظاً في القدرات مع استمرار تطور الحوسبة وظهور تقنيات الرسوميات. وخلال هذه الفترة، أصبح هناك نطاق أوسع من لغات المحاكاة وبرامجها. أما في حقبة الالفية الجديدة، فقد شهدت التطورات الحديثة في المحاكاة زيادة كبيرة في استخدامها، وظهور لغات محاكاة حديثة ذات واجهات ثلاثية الأبعاد، إضافة إلى زيادة التوافق مع حزم البرامج الأخرى مثل جداول البيانات وقواعد البيانات، وكذلك استخدام المحاكاة عبر شبكة الإنترنت. توفر هذه المجموعة من الميزات فوائد عديدة عند استخدام المحاكاة، إذ يحتاج مصمم نظام المحاكاة إلى الإلمام بالإمكانات المتاحة لاختيار الأداة المناسبة لتطوير النظام[4].

4.1 تاريخ برنامج متعدد الفيزياء

تعد المحاكاة العددية (Numerical Simulation) أداة قوية للتنبؤ بالسلوك الفيزيائي للظواهر والانظمة المدروسة. اذ توفر هذه الطريقة معلومات مفصلة عن الظاهرة المدروسة في كل نقطة من النظام، وهو أمر قد يكون مستحيلاً أحيانًا من خلال التجارب. ويعد برنامج كومسل متعدد الفيزياء (COMSOL Multiphysics) أداة محاكاة فعالة يمكنها تغطية مجموعة واسعة من المجالات الهندسية[5].

أسس كلا من ليتمرك (S. Littmarck) وسعيدي (F. Saeidi)، شركة كومسول عام 1986 في ستوكهولم. وتم اصدار النسخ الاولى من البرنامج تحت اسم فيملاب (FEMLAB) والذي تغير في عام 2005 الى كومسول متعدد الفيزياء COMSOL Multiphysics® كأسم تجاري لحزمة نمذجة قوية مبنية في الأصل على لغة برمجية وبيئة تطورية متكاملة[6]. ومنذ ذلك الحين تم اصدار العديد من التحديثات والاصدارات الجديدة على البرنامج والتي تم بها اضافة ميزات وتحسينات جديدة على البرنامج[7].

يعتمد برنامج كومسل (COMSOL) على طريقة العناصر المحددة FEM (Finite Elements Methods) وعلى نواة داخلية لحل المعادلات التفاضل الجزئية PDE (Partial Differential Equations). تحتوي النسخة الأساسية من البرنامج على ثمانية وحدات مضافة (Modules) والتي تسهل قدرات البرنامج على اجراء النمذجة. وتشمل هذه الوحدات المضافة المجالات التطبيقية الاتية: التيار المتردد والمستمر(AC/DC) ، الصوتيات، الهندسة الكيميائية، علوم الأرض، انتقال الحرارة، الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة (MEMS) ، الترددات الراديوية (RF)، والميكانيك الإنشائي. كما يوفّر البرنامج برمجيات مساعدة أخرى مثل وحدة استيراد ملفات CAD ومكتبة المواد[8].

5.1 الدراسات السابقة

في مجال تحليل تدفق الموائع الدقيقة Micro-Fluids، استخدم العديد من الباحثين برنامج كومسل (COMSOL Multiphysics) كأداة محاكاة فعالة لتقييم أداء القنوات والانابيب الدقيقة. على سبيل المثال، أجرى صالح وآخرون (N. Salih, and et al)، محاكاة عددية لتدفق المياه داخل قنوات دقيقة Micro-channels باستخدام برنامج COMSOL، وذلك بهدف تحسين التصميم الهندسي للقنوات

وتحقيق توزيع أفضل لسرعة التدفق. وقد ركزت هذه الدراسة على تأثير الأبعاد الهندسية للقناة، مثل قطر القناة وطولها وزاوية الانحدار وشكل المقطع، على سرعة تدفق الماء وتوزيعه داخل القناة. وأظهرت النتائج أن التعديلات الهندسية المناسبة يمكن أن تقلل التشتت غير المرغوب فيه وتحسن كفاءة تدفق الموائع الدقيقة. توضح هذه الدراسة أهمية استخدام التحليل العددي لتحسين أداء نظم الموائع الدقيقة قبل تصنيعها، وهو ما يمكن الاستفادة منه في نمذجة مضخة صوتية للموائع الدقيقة في هذا البحث[9].

كما أجرى لو وآخرون (H. Low and et al) دراسة باستخدام برنامج COMSOL، وذلك لتحليل الجريان داخل قناة مايكروية لجريان الموائع مخصصة لتطبيقات الأنظمة الكهروميكانيكية الدقيقة الطبية-الحيوية. وقد ركزت الدراسة على توزيع السرعة والضغط وتأثير شكل القناة على أداء الجهاز. وأكدت النتائج أن التصميم الهندسي للقنوات الدقيقة يؤثر بشكل مباشر على كفاءة حركة السوائل واستقرار الجريان الصفحي، مع ملاحظة أن التصميم الأمثل يقلل من التداخل بين التيارات ويحسن السيطرة على تدفق السوائل الدقيقة داخل النظام[10] .

وفي إطار تطوير نماذج محاكاة أكثر كفاءة، قدم اسلام و تسوي (M. Islam and Y. Tsui) نموذجاً شبه ثلاثي الأبعاد (Quasi-3D) لمحاكاة الجريان الصفائحي في أجهزة الموائع الدقيقة، مع مقارنة النتائج بالحلول العددية الكاملة لمعادلات حركة الموائع النيوتونية (الموائع التي تظل لزوجتها ثابتة ولا تتغير بغض النظر عن القوى الخارجية المؤثرة عليها). وقد أظهرت الدراسة توافقاً عالياً بين النموذج المقترح والحلول ثلاثية الأبعاد، مع تقليل كبير في زمن الحساب، كما أبرزت قدرة النموذج على تقييم تأثير التغيرات الهندسية في القنوات على سرعة الجريان وتوزيعه[11].

من ناحية أخرى، استعرضت دراسة مشرف وآخرون (H. Musharaf and et al) الأساليب الحسابية الحديثة لتفاعل الموائع مع التراكيب المعيقة للجريان (Fluid–Structure Interaction) في أنظمة جريان الموائع الدقيقة، مع التركيز على تصميم المضخات والخلاطات الدقيقة. أكدت الدراسة أن التكامل بين نماذج الجريان وتحليل الإجهادات الميكانيكية يساهم في تحسين أداء الأجهزة وزيادة كفاءتها التشغيلية، مع ملاحظة أن بعض الأشكال الهندسية تقلل من فقدان الضغط وتحسن التوزيع الموحد للسوائل[12].

أما في التطبيقات الحيوية، فقد تناولت دراسة (N. Bakuova and et al) تصميم وتحليل أجهزة جريان موائع في قنوات دقيقة (ميكروفلويدية) مصنوعة من البوليمر باستخدام برنامج COMSOL وتقنيات ديناميكا الموائع الحسابية CFD (Computational Fluid Dynamics)، مع تقييم حركة السوائل داخل القنوات وتأثير التصميم على أداء النظام. أظهرت النتائج أن النماذج العددية

تتيح تحسين تصميم القنوات لتحقيق توزيع منتظم للجريان وكفاءة عالية في التطبيقات البيولوجية، كما أبرزت الدراسة دور التصميم الهندسي للقناة في التحكم بتدفق الأدوية والسوائل الحيوية بدقة، مما يجعل هذه الدراسة مرجعاً قوياً لدعم تطوير الأجهزة الدقيقة الميكروفلويدية[13] .

ان هذه الدراسات ومثيلاتها مجتمعة توضح الدور المحوري للمحاكاة العددية في تحليل وتحسين أداء أنظمة الموائع الدقيقة، سواء في التطبيقات الهندسية أو البيولوجية، مما يدعم اعتماد برنامج COMSOL Multiphysics في نمذجة وتحليل المضخة الصوتية للموائع الدقيقة في هذا البحث.

6.1 الهدف من البحث

يهدف هذا البحث إلى دراسة مضخة صوتية في أنظمة الموائع الدقيقة (Acoustic Microfluidic Pump) من خلال نمذجة فيزيائية عددية توضّح سلوك الجريان الناتج عن تأثيرات الاهتزازات الصوتية داخل القنوات الميكروية. ويسعى البحث إلى تحليل آلية انتقال المائع تحت تأثير هذه الاهتزازات الصوتية، وبيان كيفية توليد فرق ضغط يساهم في إحداث الضخ للمائع ومن ثم التحكم باتجاه وسرعة جريان المائع.

كما يركز البحث على صياغة نموذج رياضي يعتمد على القوانين الأساسية لحركة الموائع والظواهر الصوتية، مع توظيف تقنيات المحاكاة العددية لدراسة تأثير العوامل التشغيلية والهندسية، مثل خصائص المائع، وأبعاد القنوات الدقيقة، ومعاملات الإثارة الصوتية، على الأداء الكلي للمضخة. ويُعد هذا الأسلوب أداة فعّالة لفهم السلوك الديناميكي للنظام دون الاعتماد المباشر على التجارب العملية.

ويهدف البحث أيضاً إلى إبراز كفاءة المضخات الصوتية وإمكاناتها التطبيقية ضمن أنظمة الموائع الدقيقة، خاصة في التطبيقات التي تتطلب دقة عالية وتحكمًا مستمراً بالجريان، مثل التطبيقات الطبية والحيوية. ومن المؤمل أن تسهم نتائج هذه الدراسة في توفير أساس علمي يساعد في تحسين تصميم المضخات الصوتية وتوسيع نطاق استخدامها في الأنظمة الميكروية الحديثة.

الفصل الثاني

الجزء النظري

1.2 المقدمة

في هذا الفصل سيتم شرح المفاهيم النظرية المتعلقة بموضوع البحث. إذ سيتم التطرق الى الأسس العلمية المتعلقة بسلوك الموائع وأنواعها. إضافة إلى دراسة جريان الموائع والمعادلات التي تحكمه. كما سيتم التعرف على أنواع الجريان والمعادلات المرتبطة به، مع التركيز بصورة خاصة على معادلتي الاستمرارية وبرنولي، لما لهما من أهمية أساسية في تحليل حركة الموائع. كذلك سيتم التطرق إلى أنواع مضخات الموائع، مع تسليط المزيد من الضوء على المضخات الدقيقة وبيان مبدأ عملها. ونظراً لاعتماد الدراسة على الماء كوسط تشغيلي، لذا سيتم عرض خصائصه الكيميائية والأحيائية بصورة مختصرة، مع التركيز بشكل أكبر على خصائصه الفيزيائية لما لها من تأثير مباشر في سلوك الجريان وأداء المضخة. وأخيراً، سيتم استعراض مفهوم المحاكاة (النمذجة) الحاسوبية وطرقها المختلفة، مع التركيز على النمذجة متعددة الفيزياء لكونها المنهج المعتمد في تحليل النظام المدروس.

2.2 الموائع

تعرف الموائع بأنها مواد تتميز بعدم امتلاكها شكلاً ثابتاً، وبقدرتها على التشوه المستمر عند تعرضها لإجهاد قص مهما كان صغيراً. ويعد هذا السلوك السمة الأساسية التي تميز الموائع عن المواد الصلبة. فعند تأثير قوة خارجية، لا تبدي الموائع مقاومة دائمة لإجهاد القص، وإنما تستمر في الانسياب طالما استمر تأثير القوة المؤثرة. وفي حالة السكون أو الاتزان، يتخذ المائع شكل الوعاء الذي يحتويه[14].

ويشمل مفهوم الموائع كلاً من السوائل والغازات، إذ يشتركان في خاصية الانسياب وعدم امتلاك شكل محدد مستقل. ويعود الاختلاف بين الموائع والمواد الصلبة إلى طبيعة قوى الترابط الجزيئية، حيث تكون قوى التجاذب بين جزيئات المواد الصلبة أكبر بكثير، مما يمنحها قدرة على الحفاظ على شكلها ومقاومة التشوه ضمن حدود المرونة. ففي المواد الصلبة، إذا كان الإجهاد الواقع ضمن المجال المرن، فإن الجسم يستعيد شكله الأصلي بعد زوال الحمل. أما في الموائع، فإن تطبيق أي إجهاد قص مهما كان مقداره، فان ذلك سيؤدي إلى حدوث تشوه مستمر وانسياب دائم، وهو ما يمثل الخاصية المميزة لسلوك الموائع في ميكانيك الموائع[15].

3.2 انواع الموائع

هنالك تصنيفات مختلفة لانواع الموائع، من اهمها:

1.3.2 الموائع النيوتنية وغير النيوتنية

تقسم الموائع اعتماداً على سلوك اللزوجة، إلى موائع نيوتنية وموائع غير نيوتنية. في الموائع النيوتنية توجد علاقة خطية بين إجهاد القص τ (Shear Stress) و تدرج السرعة $\left(\frac{du}{dy}\right)$ او ما يسمى بمعدل القص (Rate of Shear Strain). حيث يكون إجهاد القص متناسباً طردياً مع معدل القص او التشوه، ويعبر عن ذلك بالعلاقة:

$$\tau = \mu \left(\frac{du}{dy}\right) \qquad \dots (1\text{-}2)$$

حيث تمثل μ اللزوجة الديناميكية، وهي ثابتة عند درجة حرارة وضغط معينين، ولا تعتمد على معدل التشوه. لذلك فإن سلوك هذه الموائع يكون منتظماً ويمكن تمثيله بخط مستقيم عند رسم العلاقة بين إجهاد القص ومعدل القص[16].

أما الموائع غير النيوتنية، فلا تحقق علاقة خطية بين إجهاد القص ومعدل التشوه، إذ تتغير اللزوجة بتغير معدل القص. وتشمل هذه الفئة عدة أنواع، منها الموائع اللدنة (Plastic Fluids)، وموائع الترقق بالقص (Shear Thinning)، وموائع التغلظ بالقص (Shear Thickening). ففي الموائع اللدنة، لا يبدأ الجريان إلا بعد تجاوز قيمة معينة من إجهاد القص تعرف بإجهاد الخضوع. وتنخفض اللزوجة في موائع الترقق بالقص بزيادة معدل القص، في حين انها تزداد في موائع التغلظ بالقص بزيادة معدل القص[16].

2.3.2 الموائع القابلة للانضغاط وغير قابلة للانضغاط

يمكن تصنيف الموائع من حيث قابليتها على التغير في الحجم إلى موائع قابلة للانضغاط وموائع غير قابلة للانضغاط. فالموائع القابلة للانضغاط، هي التي يتغير حجمها أو كثافتها بصورة ملحوظة عند تغير الضغط، ويعد الغاز المثال الأكثر شيوعاً لهذا النوع. أما الموائع غير القابلة للانضغاط، فهي التي يكون التغير في حجمها أو كثافتها صغيراً جداً عند تغير الضغط، كما في السوائل. لذلك يفترض في كثير من التطبيقات الهندسية أن السوائل غير قابلة للانضغاط لتبسيط التحليل[15].

ويعرف معامل الانضغاط الحجمي (K) بأنه مقياس مقاومة المائع للتغير في الحجم تحت تأثير تغير الضغط (ΔP)، ويعبر عنه بالعلاقة:

$$K = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V_0} \qquad \dots (2\text{-}2)$$

حيث ان: ($\Delta V/V_0$) مقدار التغير في الحجم نسبة الى الحجم الاصلي (V_0) [15].

3.3.2 المائع المثالي (Ideal Fluid)

المائع المثالي هو مائع افتراضي يفترض أنه عديم اللزوجة، أي لا توجد فيه قوى احتكاك داخلية بين طبقاته أثناء الحركة. وبذلك لا يقاوم هذا المائع الانسياب، ولا يفقد طاقة نتيجة الاحتكاك الداخلي. أن هذا النوع من الموائع غير موجود عملياً في الطبيعة، إذ تمتلك جميع الموائع الحقيقية خاصية اللزوجة، وهي المسؤولة عن نشوء قوى القص الداخلية ومقاومة الحركة[15].

4.2 جريان الموائع

ممكن تعريف جريان الموائع على انه الحركة المستمرة لجسيمات المائع نتيجة تأثير قوى خارجية، ولاسيما إجهادات القص، والتي تؤدي إلى تشوه مستمر في المائع وانتقال عناصره من موضع إلى آخر داخل مجال الجريان. ويوصف الجريان من خلال متجه السرعة عند كل نقطة في المجال، إذ قد تتغير السرعة مكانياً من نقطة إلى أخرى أو زمنياً مع مرور الوقت. وتسمى المنطقة التي يحدد فيها توزيع السرعات باسم مجال الجريان (Flow Field)[16].

وتتم دراسة جريان الموائع بطريقتين أساسيتين هما:

الطريقة اللاغرانجية (Lagrangian Method): تعتمد هذه الطريقة على تتبع جسيم مائع مفرد أثناء حركته داخل مجال الجريان، حيث يتم وصف موقعه وسرعته وتسارعه بدلالة الزمن. ويكون الوصف في هذه الحالة معتمداً على الجسيم نفسه، اذ يستخدم في هذه الطريقة نظام إحداثيات متحرك يتبع حركة الجسيم[16].

الطريقة الأويلرية (Eulerian Method): تعتمد هذه الطريقة على دراسة خصائص الجريان عند نقاط ثابتة في الفضاء دون تتبع جسيم معين، حيث يتم التعبير عن متجه السرعة والخواص الأخرى بدلالة المكان والزمان. وتعد هذه الطريقة الأكثر استخداماً في التحليل الهندسي لجريان الموائع لسهولتها في التطبيق الرياضي[16].

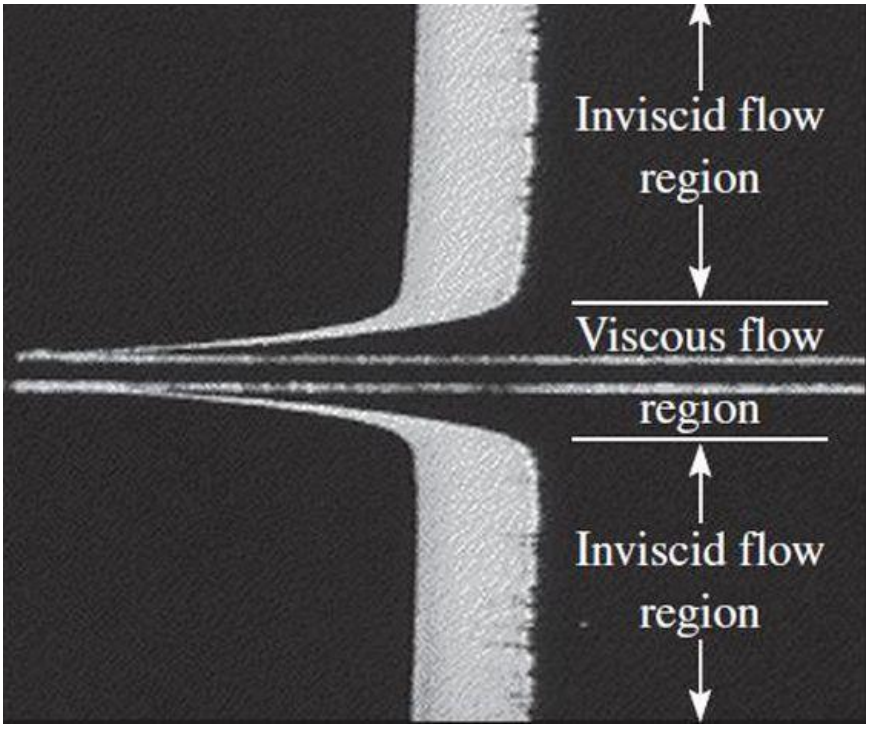
5.2 انواع جريان الموائع

يعد تصنيف جريان الموائع من الموضوعات الأساسية في ميكانيكا الموائع، إذ تختلف خصائص الجريان تبعاً للظروف الفيزيائية والهندسية المحيطة به. ويسهم هذا التصنيف في تسهيل التحليل الرياضي وفهم السلوك الفيزيائي للمائع[17]. وفيما يلي أهم تصنيفات جريان الموائع:

1.5.2 الجريان اللزج و الجريان غير اللزج

عند حركة جسم داخل مائع، تنشأ قوى احتكاك نتيجة لزوجة المائع، وتكون هذه التأثيرات واضحة بالقرب من السطوح الصلبة. وتسمى المنطقة المجاورة للسطح الصلب بالطبقة الحدية، حيث تكون تأثيرات اللزوجة كبيرة ولا يمكن إهمالها. أما في المناطق البعيدة عن السطح، فتكون تأثيرات اللزوجة ضعيفة نسبياً، ويمكن في كثير من الحالات إهمالها لتبسيط التحليل دون فقدان يذكر في الدقة.

ويتضح ذلك عند إدخال صفيحة مستوية موازية للتيار في مائع غير قابل للانضغاط، إذ تتكون طبقة حدية رقيقة قرب الحافة الأمامية، وتزداد سماكتها تدريجياً على طول الصفيحة. وبناءاً على ذلك، يقسم المجال إلى منطقة جريان لزج داخل الطبقة الحدية ومنطقة جريان غير لزج خارجه، وكما موضح في الشكل (2-1)[17].



الشكل(2-1): مناطق الجريان اللزج (Viscous Flow) بجوار صفيحة مسطحة من كلا الجانبين، ومناطق الجريان غير اللزج (Inviscid Flow) بعيداً عن سطح الصفيحة[17].

2.5.2 الجريان الداخلي والجريان الخارجي

يصنف الجريان اعتماداً على ما إذا كان المائع محصوراً بالكامل داخل حدود صلبة أم لا إلى جريان داخلي أو جريان خارجي. اذ يسمى جرياناً داخلياً عندما يكون المائع محصوراً داخل أنبوب أو قناة أو مجرى محاط بسطوح صلبة. ويسمى جرياناً داخلياً عندما يتحرك المائع فوق سطح صلب أو حول جسم مغمور في مائع غير محدود. وتؤثر اللزوجة في الجريان الداخلي في معظم المجال، بينما في الجريان الخارجي تتركز تأثيرات اللزوجة غالباً في طبقة حدية رقيقة قريبة من السطح، يليها مجال يمكن اعتباره غير لزج تقريباً[17].

3.5.2 الجريان القابل للانضغاط والجريان غير القابل للانضغاط

يمكن تصنيف الجريان تبعاً لتغير كثافة المائع أثناء الحركة. فإذا كان تغير الكثافة ضئيلاً جداً بحيث يمكن إهماله، عندها يعد الجريان غير قابل للانضغاط. أما إذا كان تغير الكثافة ملحوظاً، فيعد الجريان قابلاً للانضغاط. وتعامل السوائل عادة على أنها غير قابلة للانضغاط بسبب ثبات كثافتها نسبياً، في حين تعد الغازات قابلة للانضغاط لتغير كثافتها بتغير الضغط ودرجة الحرارة. ويستخدم عدد ماخ (Ma) للتعبير عن نسبة سرعة جريان المائع (v) إلى سرعة الصوت في الوسط (c)، وحسب المعادلة الاتية:

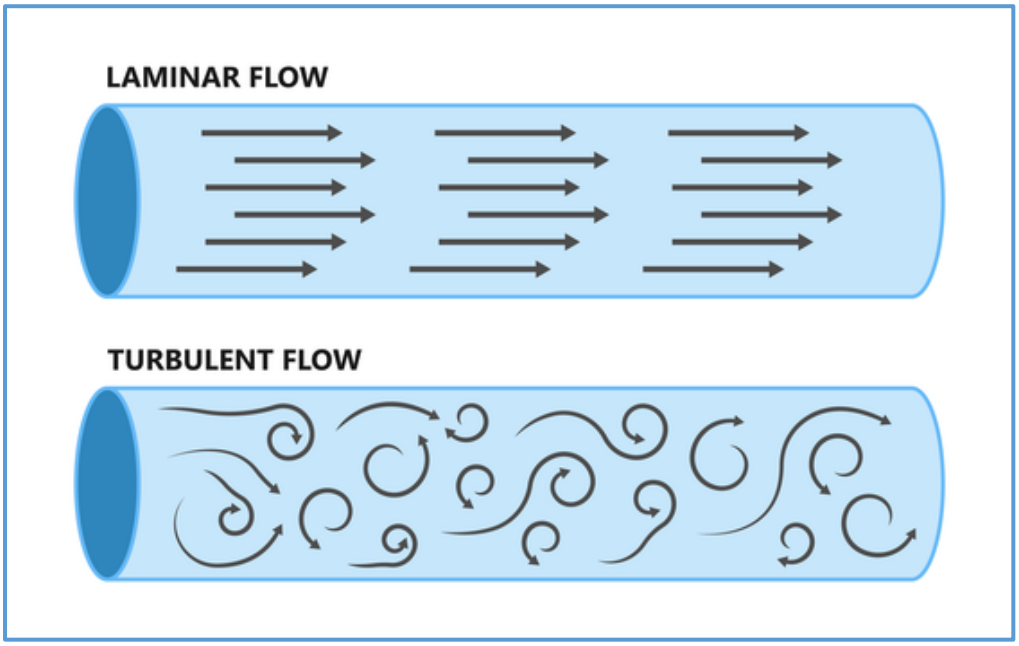
$$Ma = \frac{v}{c} \qquad \dots (3\text{-}2)$$

فعندما يكون عدد ماخ اقل من 0.3 تقريبا، يمكن اعتبار الجريان غير قابل للانضغاط، أما عند اقتراب عدد ماخ من الواحد الصحيح أو تجاوزه، فتصبح تأثيرات الانضغاط ذات أهمية كبيرة[17].

4.5.2 الجريان الصفائحي والجريان المضطرب

يكون الجريان الصفائحي او الطبقي (Laminar Flow) عندما تتحرك جسيمات المائع في مسارات منتظمة ومتوازية تقريباً، ويحدث غالباً عند السرعات المنخفضة أو في الموائع ذات اللزوجة العالية. أما الجريان المضطرب (Turbulent Flow) فيتميز بحركة عشوائية وتقلبات مستمرة في السرعة والضغط، مع ظهور دوامات وتداخل في طبقات المائع، وكما موضح في الشكل (2-2). وقد

أثبتت تجارب العالم أوزبورن رينولدز أن عدد رينولدز يمثل معياراً مهماً للتمييز بين النمطين، إذ يعتمد على نسبة قوى العطالة (القصور الذاتي) إلى قوى اللزوجة[17].



الشكل(2-2): الجريان الصفائحي (Laminar Flow)، والجريان المضطرب (Turbulent Flow)[18].

5.5.2 الجريان الطبيعي (غير القسري) والجريان القسري

يسمى الجريان طبيعياً أو غير قسري عندما ينشأ نتيجة فروق الكثافة الناتجة عن اختلاف درجات الحرارة، كما في ظاهرة الحمل الحراري الطبيعي. أما الجريان القسري فيحدث عندما يجبر المائع على الحركة بفعل مؤثر خارجي مثل مضخة أو مروحة أو فرق ضغط مفروض[17].

6.5.2 الجريان المستقر والجريان غير المستقر

يوصف الجريان بأنه مستقر إذا كانت خواصه (السرعة، الضغط، الكثافة) عند نقطة معينة لا تتغير مع الزمن، حتى وإن اختلفت من نقطة إلى أخرى داخل المجال. أما إذا تغيرت هذه الخواص مع الزمن عند نقطة معينة، فيسمى جرياناً غير مستقر. وفي بعض التطبيقات، يمكن تمثيل الجريان غير المستقر بمتوسط زمني إذا كان التغير دورياً ومنتظماً. وتعد معظم الأجهزة الهندسية، مثل التوربينات والمضخات والمبادلات الحرارية، أمثلة على أنظمة يمكن تقريب عملها على أنه جريان مستقر[17].

7.5.2 الجريان أحادي وثنائي وثلاثي الأبعاد

يعتمد وصف الجريان من حيث الأبعاد على عدد الإحداثيات المكانية اللازمة لوصف خواصه. فيكون الجريان أحادي البعد إذا اعتمدت الخواص على إحداثي مكاني واحد فقط كما في الجريان في انبوب مستقيم. ويكون الجريان ثنائي البعد إذا اعتمدت على إحداثيين كما في الجريان على صفيحة مستوية. ويكون الجريان ثلاثي الأبعاد إذا تطلب الوصف ثلاثة إحداثيات مكانية. كما في الجريان حول كرة[17].

6.2 معادلات جريان الموائع

1.6.2 معادلة الاستمرارية (Continuity Equation)

تعتمد طريقة حساب سرعة تدفق السوائل على مبدأ الاستمرارية، والذي يعد من المبادئ الأساسية في ميكانيكا الموائع. وينص هذا المبدأ على أن معدل تدفق الكتلة يبقى ثابتاً عبر أي مقطع من مقاطع الأنبوب في حالة الجريان المستقر. بعبارة أخرى، إذا كان السائل يتدفق خلال أنبوب ذي مقاطع عرضية مختلفة، فإن كمية السائل التي تعبر مقطعاً معيناً خلال وحدة الزمن تساوي الكمية التي تعبر أي مقطع آخر من الأنبوب، بشرط عدم وجود تسرب أو إضافة للكتلة داخل النظام[19].

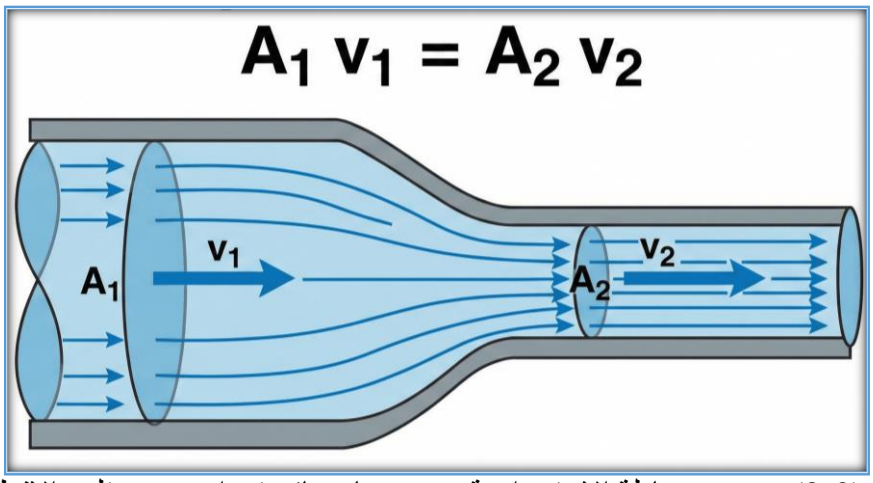
ويمكن التعبير رياضياً عن مبدأ الاستمرارية كما يأتي:

$$m = PAv \qquad \dots (4\text{-}2)$$

حيث أن (m) تمثل معدل تدفق الكتلة، و (P) كثافة السائل، و (A) مساحة المقطع العرضي للجريان، و(v) سرعة الجريان. وعند ثبات الكثافة تصبح المعادلة بالشكل:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \qquad \dots (5\text{-}2)$$

وهو ما يعني أن سرعة السائل تزداد عندما تقل مساحة المقطع العرضي، وتقل عندما تزداد المساحة، بحيث يبقى معدل التدفق الحجمي ثابتاً، وكما موضح في الشكل (2-3). وتعد هذه المعادلة ذات أهمية كبيرة في تحليل أنظمة الأنابيب، ودراسة تغيرات السرعة والضغط والارتفاع، كما تستخدم في التطبيقات الهندسية مثل شبكات المياه، وأنظمة الضخ، وتصميم القنوات والممرات الهيدروليكية[19].



الشكل(2-3): مفهوم معادلة الاستمرارية عند جريان مائع في انبوب مختلف الاقطار[19].

2.6.2 معادلة برنولي (Bernoulli's Equation)

تعد معادلة برنولي من المعادلات الأساسية في ميكانيك الموائع، إذ تعبر عن مبدأ حفظ الطاقة في الجريان المستقر لمائع مثالي غير لزج وغير قابل للانضغاط، على طول خط انسياب واحد. وتنص المعادلة على أن مجموع طاقة الضغط، والطاقة الكامنة التثاقلية (الناتجة بسبب الارتفاع النسبي)، والطاقة الحركية للمائع يبقى ثابتاً بين اي نقطتين في محور الجريان[19].

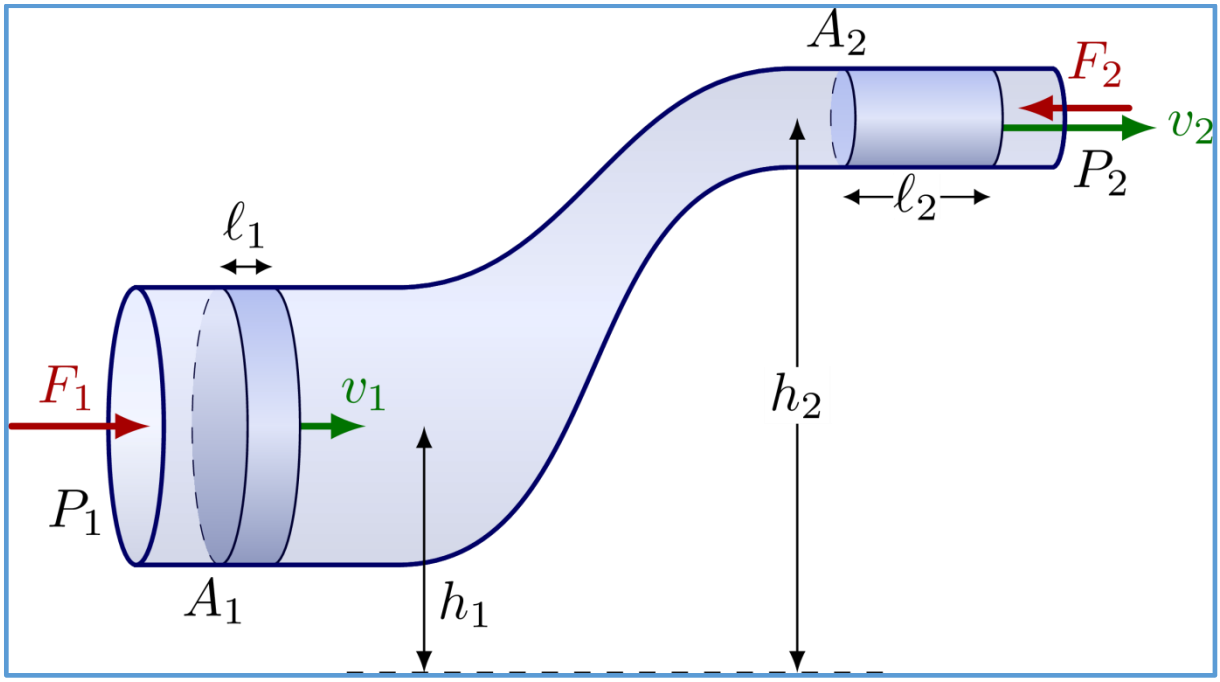
وتكتب معادلة برنولي بالصيغة الاتية عند اي نقطة داخل مجرى المائع:

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = constant$$

حيث إن (P) تمثل ضغط المائع، (ρ) كثافة المائع، (v) سرعة جريان المائع عند هذه النقطة، (h) ارتفاع منسوب المائع عن سطح الارض، (g) التعجيل الارضي. وكما موضح في الشكل (2-4)، تعطى المعادلة بين اي نقطتين (مثل 1 و 2) في مجرى المائع، بالصيغة الاتية:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

وتعكس معادلة برنولي مبدأ أن أي زيادة في أحد أشكال الطاقة يقابلها نقصان في شكل آخر، بشرط عدم وجود فقد في الطاقة بسبب الاحتكاك أو وجود أجهزة ميكانيكية تضيف أو تسحب طاقة من النظام. لذلك تستخدم معادلة برنولي على نطاق واسع في تحليل أنظمة الجريان داخل الأنابيب والقنوات المفتوحة، وكذلك في دراسة سلوك الموائع حول الأجسام الصلبة وفي التطبيقات الهندسية مثل المضخات والفوهات وأنظمة الموائع الدقيقة[19].



الشكل(2-4): اهم المتغيرات الفيزيائية في معادلة برنولي للنقطتين (1) و (2)[19].

7.2 مضخات الموائع

تعد المضخات من العناصر الأساسية في أنظمة نقل الموائع، حيث تقوم بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة هيدروليكية لزيادة ضغط وسرعة المائع. اذ تستخدم المضخات لنقل السوائل بين مناطق مختلفة، سواء على نفس المستوى أو إلى ارتفاعات مختلفة، مما يتيح التحكم في تدفق المائع بما يتوافق مع متطلبات النظام. وتختلف المضخات في تصميمها وآلية عملها وفقاً للوظائف المطلوبة، ويعتمد اختيار النوع المناسب على خصائص المائع، معدل الجريان (التدفق)، الضغط المطلوب، والكفاءة التشغيلية، لضمان تحقيق الأداء الأمثل في التطبيقات الصناعية والهندسية المختلفة[14].

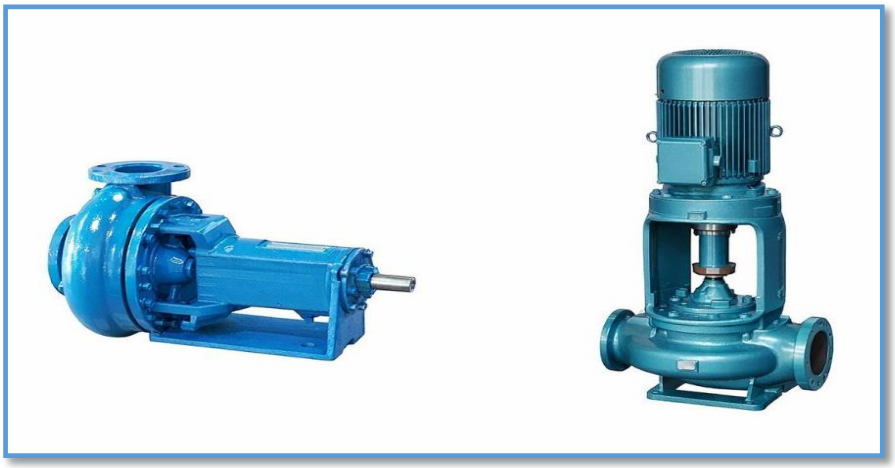
8.2 انواع مضخات الموائع

1.8.2 المضخات الديناميكية

توفر المضخات الديناميكية تدفقاً مستمراً وثابتاً من جهة السحب إلى جهة الطرد، وتعتمد على تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة حركية ثم إلى طاقة ضغط داخل السائل وفقاً لمبدأ برنولي. تتميز هذه المضخات بالكفاءة العالية، والاستمرارية، وسهولة دمجها بأنواع مختلفة من المحركات[20].

وتقسم المضخات الديناميكية الى:

المضخات الطاردة المركزية: تعتمد هذه المضخات على تحويل الطاقة الحركية الناتجة عن دوران المروحة الدافعة إلى طاقة ضغط داخل السائل. وتستخدم على نطاق واسع لنقل السوائل ذات التدفق الكبير بكفاءة جيدة، لكنها تواجه تحديات عند التعامل مع سوائل غير متجانسة أو تحتوي على جسيمات صلبة، كما قد تتأثر بظاهرة التجاويف (Cavitation)[21]. ويوضح الشكل (2-5) بعض انواع المضخات الطاردة المركزية.



الشكل(2-5): بعض أنواع المضخات الطاردة المركزية[20]

المضخات الديناميكية ذات التأثير الخاص: وتعمل هذه المضخات على نقل المائع من مكان الى اخر دون وجود أجزاء دوارة داخلية فيها، وتشمل الانواع: مضخات الفوهة، والمضخات الهيدروليكية بالمكبس، ومضخات الرفع بالغاز، والمضخات الكهرومغناطيسية. تعد هذه المضخات مناسبة للسوائل القاسية وقليلة الصيانة، رغم كفاءتها الهيدروليكية الأقل مقارنة بالمضخات الدوارة[20].

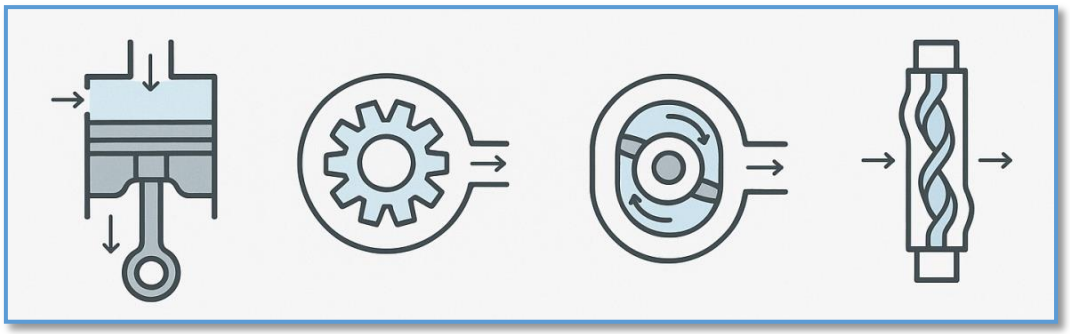
2.8.2 مضخات الإزاحة الموجبة

تحجز المضخات الإزاحة الموجبة حجماً محدداً من السائل داخل حجرة مغلقة، وتدفعه عبر صمامات أحادية الاتجاه. تحافظ على معدل تدفق شبه ثابت، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي تتطلب دقة في معدل الجريان وضغطاً مستقراً[22]. ومن انواعها:

المضخات الترددية: وتعتمد على حركة مكبس داخل أسطوانة، وتولد ضغوطاً عالية عند تصاريف منخفضة[22].

المضخات الدوارة: تنقل السائل باستخدام عناصر دوارة مثل التروس أو الريش، وتتميز بجريان منتظم، مناسبة للسوائل اللزجة ومعدلات التدفق الأعلى[22].

ويوضح الشكل (2-6) بعض أنواع مضخات الإزاحة الموجبة.



الشكل(2-6):مخطط يوضح بعض انواع مضخات الإزاحة الموجبة[14].

3.8.2 المضخات الدقيقة (Micro-pumps)

تعد المضخات الدقيقة عناصر أساسية في أنظمة الميكروفلويدكس (Microfluidics) وأنظمة المختبر على رقاقة (Lab-on-a-Chip)، إذ تستخدم لنقل كميات صغيرة جداً من السوائل بدقة عالية ضمن قنوات ميكروية ذات أبعاد ميكرومترية. وتمتاز هذه المضخات بصغر الحجم، انخفاض استهلاك الطاقة، وإمكانية دمجها مع تقنيات اخرى. ويعتمد تصميمها على توليد فرق ضغط داخل النظام المصغر باستخدام آليات ميكانيكية أو فيزيائية مختلفة، بما يتناسب مع طبيعة السائل ومتطلبات الجريان والضغط[23].

تتكون المضخات الترددية عادة من العناصر الآتية[23]:

- حجرة ضخ: يتم داخلها تغيير الحجم.
- غشاء مرن: يتحرك استجابةً لمؤثر خارجي.
- صمام دخول وصمام خروج: يعملان على منع الجريان العكسي.
- عنصر تحفيز: مثل العنصر الكهروضغطي أو الكهروستاتيكي أو الحراري-الهوائي[23].

ويمكن تصنيف المضخات الدقيقة بصورة عامة إلى عدد انواع[23]:

المضخات الترددية: وتعتمد في عملها على مبدأ الإزاحة الحجمية الدورية، حيث يتحرك عنصر ميكانيكي (غشاء أو مكبس) بشكل تذبذبي لتوليد فرق ضغط دوري. وتشمل المضخات الترددية الانواع: مضخات الغشاء، والمضخات تمعجية، والمضخات عديمة الصمامات.

مضخات الجريان المستمر: وهذه المضخات لا تعتمد على تغيير حجمي دوري، بل على قوى فيزيائية تؤثر مباشرة داخل السائل.

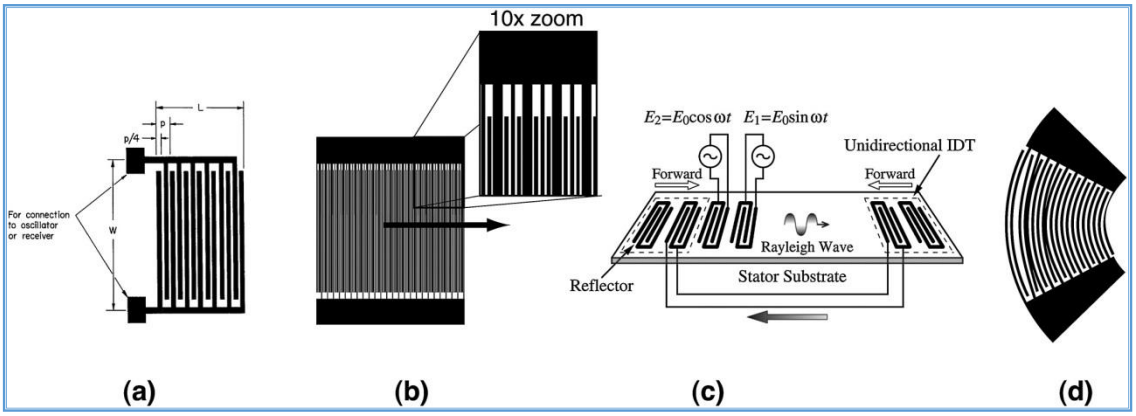
المضخات الكهروهيدروديناميكية: وتعتمد هذه المضخات على حركة الشحنات الكهربائية داخل السائل بفعل مجال كهربائي، مما يولد قوة دافعة.

المضخات المغناطوهيدروديناميكية: وتعتمد على تأثير لورنتز الناتج عن تفاعل مجال مغناطيسي مع تيار كهربائي داخل سائل موصل.

المضخات الكهروأسموزية: وتعتمد على حركة طبقة الشحنات المزدوجة عند جدار القناة تحت تأثير مجال كهربائي، وتستخدم بكثرة في أنظمة التحليل الكيميائي.

المضخات الصوتية الدقيقة: وهو النوع الذي تمت دراسته في هذا البحث. وتعد هذه المضخات من التقنيات الحديثة في مجال الأنظمة الميكروية، إذ تعتمد على استخدام الموجات الصوتية أو فوق الصوتية لتحريك الموائع داخل القنوات الدقيقة دون الحاجة إلى أجزاء ميكانيكية متحركة. وتستند هذه التقنية إلى توظيف محولات كهرضغطية لتوليد موجات صوتية تنتشر عبر ركيزة صلبة أو مباشرة داخل الوسط السائل، مما يسمح بإحداث تأثيرات ميكانيكية دقيقة على المائع[24].

ويعتمد مبدأ عمل المضخات الصوتية بصورة أساسية على ظاهرة الجريان الصوتي (Acoustic Streaming) كما موضح في الشكل (2-7)، وهي حركة منتظمة تنشأ نتيجة التفاعلات غير الخطية بين المجال الصوتي والمائع اللزج. فعند انتقال الموجة الصوتية إلى السائل وامتصاص جزء من طاقتها، يتولد توزيع غير متجانس للضغط يؤدي إلى ظهور قوى حجمية صافية تدفع المائع باتجاه معين داخل القناة. ويمكن التحكم بكفاءة الضخ ومعدل التدفق من خلال تعديل تردد الموجة الصوتية وسعتها، إضافة إلى تصميم القنوات الهندسية ونوع الموجة المستخدمة، مثل الموجات السطحية الصوتية SAW (Surface Acoustic Waves) أو الموجات السطحية فوق الصوتية عالية التردد. وتوفر هذه الآلية وسيلة فعالة لتحقيق تدفق مستمر ودقيق في الأنظمة ذات الأبعاد الميكروية[24].



الشكل (2-7): يوضح تصاميم مختلفة للمضخات الصوتية: (a) المضخة البسيطة ذات الأصابع بين القطبين، (b) المضخة ذات محولات الطاقة أحادية الاتجاه أحادية الطور لتوجيه أغلب الطاقة في اتجاه واحد، (c) المضخة ذات تركيب الدوران لإرجاع الطاقة إلى المحول الأصلي، و(d) المضخة ذات التصميم المتدرج لتركيز الطاقة الصوتية[24].

9.2 الماء وخصائصه

يعد الماء من أهم العناصر الأساسية لاستمرار الحياة على سطح الأرض، إذ يشكل المكون الرئيس لأجسام الكائنات الحية ويدخل في تركيب الخلايا والأنسجة. يتميز الماء بخصائص فيزيائية وكيميائية فريدة، ناتجة عن تركيبه الجزيئي (H_2O) وروابطه الهيدروجينية، مما يمنحه قدرة عالية على إذابة العديد من المواد، لذا يعرف بالمذيب العام. كما يسهم في تنظيم درجة حرارة الكائنات الحية والبيئة المحيطة بفضل سعته الحرارية المرتفعة، ويؤدي دوراً مهماً في التفاعلات الحيوية مثل عمليات الأيض والنقل داخل الخلايا. إضافة إلى ذلك، يعد الماء عنصرا حيويا في الأنشطة الصناعية والزراعية والطبية، مما يجعله موردا استراتيجيا لا غنى عنه لاستمرار التنمية والحفاظ على التوازن البيئي[25].

وفيما يلي توضيح لبعض خصائص الماء:

1.9.2 خصائص الماء البيولوجية

يعد الماء عنصراً أساسياً لجميع أشكال الحياة، إذ تعتمد عليه خلايا الكائنات الحية اعتمادا مباشرا في بنيتها ووظائفها الحيوية. يشكل الماء النسبة الأكبر من كتلة الخلية، ويعمل بوصفه الوسط الذي تتم فيه جميع التفاعلات الكيميائية الحيوية. تعود أهميته البيولوجية إلى طبيعته القطبية وقدرته العالية على تكوين الروابط الهيدروجينية، مما يمنحه خصائص فريدة تجعله مناسباً لدعم العمليات الحيوية المعقدة داخل الأنظمة الحية[26].

يعمل الماء كمذيب قطبي قادر على إذابة معظم الجزيئات الحيوية، مثل الأحماض الأمينية، والسكريات، والأيونات، الأمر الذي يتيح انتقال المواد داخل الخلية وبين الخلايا المختلفة. كما يشارك الماء مباشرة في العديد من التفاعلات الكيميائية الحيوية، مثل تفاعلات التحلل المائي، حيث يعد متفاعلاً أساسياً في تفكيك المركبات الكبيرة إلى وحدات أصغر يمكن للخلية الاستفادة منها. وتكمن أهمية هذه الخاصية في كونها ضرورية لعمليات الهضم الخلوي، والتنفس الخلوي، والتمثيل الضوئي[26].

إلى جانب دوره كمذيب ومتفاعل للجزيئات الحيوية، يسهم الماء في تنظيم البنية الفراغية للجزيئات الحيوية الكبيرة، ولا سيما البروتينات والأحماض النووية. إذ تؤثر التفاعلات بين جزيئات الماء والمجموعات الكيميائية المختلفة في طيّ البروتينات وتثبيت بنيتها الثلاثية والرباعية. كما أن ما يعرف بالماء المرتبط، وهو الماء الذي يتواجد في الطبقة المحيطة بالبروتينات والجزيئات الحيوية، يؤدي دوراً مهماً في استقرارها البنيوي والحراري وفي الحفاظ على نشاطها الوظيفي. كذلك، تسهم التفاعلات النافرة للماء في توجيه ترتيب السلاسل الجانبية داخل البروتين، مما يسمح بتكوين بنية مستقرة قادرة على أداء وظيفتها الحيوية بكفاءة[26].

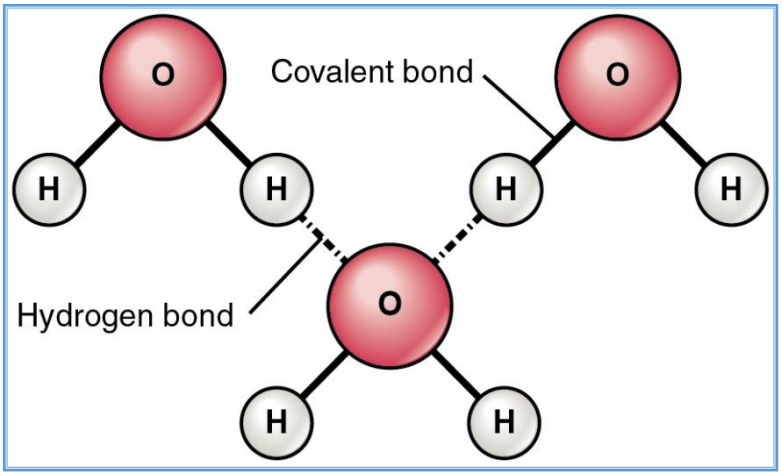
يلعب الماء أيضاً دوراً جوهرياً في تنظيم الاتزان الأسموزي داخل الخلايا وخارجها، إذ ينتقل عبر الأغشية الخلوية استجابة لفروق التركيز، مما يضمن الحفاظ على حجم الخلية وشكلها واستقرار بيئتها الداخلية. ويعد هذا التوازن ضروريًا لاستمرار العمليات الحيوية ومنع حدوث اضطرابات قد تؤدي إلى تلف الخلايا أو موتها. كما يسهم الماء في نقل المغذيات والفضلات داخل الجسم، مما يجعله عنصراً أساسياً في عمليات الدوران والإخراج[26].

كما أظهرت الدراسات الحديثة أن تنظيم الماء على أسطح المواد الحيوية يؤثر في امتصاص البروتينات والتصاق الخلايا، مما ينعكس على الاستجابة المناعية للجسم. ويعد وجود طبقات منظمة من الماء على السطوح الحيوية عاملًا مهمًا في تقليل التفاعلات غير المرغوبة بين المواد المزروعة والأنسجة الحية، مما يبرز دور الماء بوصفه عنصراً تنظيمياً فعالاً في التوافق الحيوي، وليس مجرد وسط سلبي[26].

وبذلك يتضح أن الماء ليس مجرد مكون أساسي من مكونات الخلية، بل هو عنصر ديناميكي يشارك بصورة مباشرة وغير مباشرة في تنظيم البنية الحيوية، وضبط التوازن الداخلي، وتسهيل التفاعلات الكيميائية، والحفاظ على استقرار الأنظمة البيولوجية بأكملها[26].

2.9.2 خصائص الماء الكيميائية

- **الروابط الهيدروجينية:** تمثل الروابط الهيدروجينية القوى التي تربط جزيئات الماء ببعضها البعض كما موضح في الشكل (2-8)، وتتكون نتيجة جذب ذرات الهيدروجين المرتبطة تساهمياً بالأكسجين في جزيء ماء لذرات الأكسجين في جزيئات ماء أخرى. هذه الروابط تمنح الماء قدرته على التماسك وتحدد خصائصه الفريدة مثل التوتر السطحي العالي، وارتفاع درجات الغليان والتجمد مقارنة بالسوائل الأخرى ذات الوزن الجزيئي المماثل. كما تلعب دوراً مهماً في تنظيم الحركة والتفاعلات بين الجزيئات داخل المحاليل البيولوجية، وتساهم في ثبات الهياكل ثلاثية الأبعاد للبروتينات والأحماض النووية، مع إمكانية تكوينها وكسرها بسهولة تحت تأثير الحرارة أو القوى الميكانيكية، مما يجعل الماء مذيبا فعالا ووسيطا حيويا في التفاعلات الكيميائية[27].



الشكل (2-8): مخطط لجزيئات الماء مع اواصرها التساهمية (Covalent Bond) ما بين ذرات الجزيئة الواحدة، والاواصر الهيدروجينية (Hydrogen Bond) ما بين الاجزيئات المتجاورة[27].

- **التركيب الجزيئي والقطبي:** جزيئة الماء لها شكل زاوي، حيث يرتبط فيها ذرتا هيدروجين بذرة أكسجين واحدة بزاوية تقارب 104.5 درجة، مما يمنح الجزيئة قطبية واضحة مع توزيع غير متساوي للشحنات. الجزء الموجب يقع عند ذرات الهيدروجين والجزء السالب عند الأكسجين، وهذا التوزيع يجعل الماء قادرا على تكوين روابط هيدروجينية قوية مع جزيئات أخرى قطبية، ويساعد في إذابة العديد من المركبات العضوية وغير العضوية. ان القطبية العالية لجزيئة الماء

تفسر قدرتها على الاستقطاب وسهولة تفاعلها مع الأيونات، كما تساهم في قدرتها على تكوين محيط جزيئي منظم حول الجزيئات المذابة[27].

- **الاذابة:** الماء قادر على إذابة مجموعة واسعة من المواد بسبب قطبيته العالية وتفاعله مع الشحنات، سواء كانت جزيئات قطبية أو أيونات. وتسمح المحاليل المائية بانتقال الأيونات والجزيئات الحيوية وتسهيل التفاعلات الكيميائية داخل الخلايا. تتفاعل المواد المحبة للماء مع جزيئات الماء بسهولة، بينما تؤثر المواد النافرة للماء على تنظيم الروابط الهيدروجينية في المحيط المائي، وهو ما يحدد استقرار البروتينات وتجمعاتها، بالإضافة إلى تكوين الأغشية البيولوجية والمحافظة على شكلها ووظيفتها[27].

3.9.2 خصائص الماء الفيزيائية

الكثافة ودرجة التجمد والغليان: يتميز الماء بخصائص كثافة غير عادية، إذ تصل كثافته إلى أقصى قيمة عند(4^oC)، وتقل عند درجات الحرارة الأعلى أو الأقل، مما يؤدي إلى طفو الجليد على الماء السائل. درجة التجمد للماء عند الضغط الجوي القياسي هي (0^oC)، في حين تبلغ درجة الغليان (100^oC). هذا الاختلاف بين التجمد والغليان نسبياً يعد عالي مقارنة بالسوائل ذات الوزن الجزيئي المماثل، ويعود السبب في ذلك إلى الروابط الهيدروجينية التي تتشكل بين جزيئات الماء، مما يمنحه ثباتاً حرارياً يساعد على تنظيم الحرارة في الأنظمة البيئية والحيوية[27].

السعة الحرارية: يمتلك الماء سعة حرارية عالية، ما يعني قدرته على امتصاص كميات كبيرة من الحرارة دون تغير ملحوظ في درجة حرارته، وهو ما يساعد على استقرار البيئة المحيطة والكائنات الحية. هذه الخاصية تسمح للماء بتخزين ونقل الطاقة الحرارية بكفاءة، وتساهم في تنظيم حرارة الكائنات الحية من خلال عمليات التبخر والعرق والنقل الحراري في المحيطات والأنهار، مما يوفر حماية للأنظمة البيولوجية من التغيرات المفاجئة في الحرارة[27].

الحرارة النوعية والتبخر: يمتاز الماء بحرارة تبخر مرتفعة، إذ يحتاج إلى كمية كبيرة من الطاقة لتحويله من الحالة السائلة إلى الغازية. هذه الخاصية تجعل الماء وسيلة فعالة لنقل الحرارة وتبريد الأسطح، كما تلعب دورا في عمليات التبخر داخل الكائنات الحية والنباتات. الحرارة النوعية العالية تمكن الماء من مقاومة التغيرات الحرارية السريعة، وهو أمر ضروري لاستقرار التفاعلات الكيميائية داخل الخلايا وحماية الأنظمة البيئية[27].

اللزوجة والتوتر السطحي: تساعد اللزوجة المرتفعة نسبياً للماء على مقاومة التدفق السريع، بينما يمنح التوتر السطحي العالي الناتج عن الروابط الهيدروجينية بين الجزيئات الماء القدرة على تكوين شكل

قطرات، والحفاظ على تماسكه على الأسطح. هذه الخصائص مهمة في نقل الماء داخل النباتات من الجذور إلى الأوراق، وتساعد الكائنات الدقيقة على التكيف مع البيئة المائية، كما تسهم في الحفاظ على شكل الأغشية البيولوجية واستقرارها[27].

التأين: يمتلك الماء القدرة الذاتية على التأين بحيث ينفصل جزء من جزيئاته إلى أيونات هيدروجين (H^+) وأيونات هيدروكسيل (OH^-)، مما يجعله أساساً للعديد من التفاعلات الكيميائية الحيوية. يحدد هذا التأين درجة حموضة المحاليل المائية ويساعد في نقل البروتونات داخل الأنظمة البيولوجية، وهو عامل أساسي في عمليات تحفيز الإنزيمات وتفاعلات الأحماض والقواعد. كما أن التأين يسهم في التوصيل الكهربائي للماء وقدرته على إذابة الأملاح والمركبات القطبية، مما يعزز دوره كمذيب عام[27].

10.2 المحاكاة (النمذجة) الحاسوبية

تمثل المحاكاة عملية استخدام نموذج لاستخلاص استنتاجات حول سلوك عناصر العالم الحقيقي. في المحاكاة الحاسوبية، ينشأ النموذج عن طريق البرمجة على الحاسوب، مما يسمح بدراسة الأنظمة المعقدة أو الغير موجودة عملياً. وقد واكتسبت أهمية متزايدة بفضل توفر أجهزة الحاسوب، حيث تعتبر المحاكاة أداة فعالة لدراسة الأنظمة المعقدة التي يصعب تمثيلها بالنماذج التحليلية أو الرياضية وحدها يتيح استخدام الحاسوب محاكاة عمليات الأنظمة الواقعية، وجمع بيانات دقيقة يتم تحليلها إحصائياً لفهم سلوك النظام، وتقدير خصائصه، وتقديم استنتاجات موثوقة. تتيح المحاكاة أيضاً التحكم في الظروف التجريبية، ما يجعل المقارنات بين الحلول المختلفة أكثر دقة وموثوقية[28].

تهدف المحاكاة عادة الى[28]:

- **دراسة أنظمة غير موجودة:** حيث يكون بناء نموذج فعلي مكلفًا جدًا أو مستحيلًا، مثل الطائرات أو المفاعلات النووية أو الأنظمة الاقتصادية.
- **دراسة أنظمة موجودة:** حيث تكون التجارب مكلفة أو محفوفة بالمخاطر أو تحدث اضطرابًا كبيرًا، مثل وحدات مناولة المواد، الأنظمة العسكرية، أو أنظمة النقل.
- **إعداد نموذج تنبؤي:** لتحليل سلوك الأنظمة على مدى فترات زمنية طويلة بصيغة مضغوطة، مثل النمو السكاني، انتشار الحرائق، أو التوسع العمراني.
- **التعامل مع النظم المعقدة عديمة الحلول التحليلية:** مثل المعادلات التفاضلية غير الخطية أو المسائل العشوائية، حيث لا تتوفر حلول عملية[28].

ولعملية المحاكاة فوائد عديدة، منها[28]:

- **تقليل المخاطر:** المحاكاة تمكن من دراسة النتائج المحتملة لنظام جديد أو تعديل نظام قائم قبل التطبيق الواقعي.
- **اختبار البدائل:** باستخدام سيناريوهات "ماذا لو" يمكن مقارنة البدائل واختيار الحل الأفضل.
- **توثيق النظام:** خلال بناء المحاكاة، يقوم المصمم بتحديد العلاقات المنطقية، ما يكشف عن أوجه القصور والمتطلبات غير الواضحة.
- **جمع المعرفة:** المصادر والمعلومات المتنوعة تجمع لأول مرة أثناء المحاكاة، وتصبح مفيدة طوال دورة حياة المشروع.
- **تحليل الطوابير والموارد:** جزء كبير من المحاكاة يركز على تخصيص الموارد المحدودة ودراسة ازدحام النظام وإيجاد الحلول المناسبة[28].

11.2 انواع المحاكاة الحاسوبية

1.11.2 المحاكاة باستخدام طريقة العناصر المحددة

تعد طريقة العناصر المحددة FEM (Finite Elements Method) أداة عددية متقدمة تستخدم لتحليل ودراسة الأنظمة الهندسية والفيزيائية المعقدة، سواء كانت هياكل صلبة، او انتقال حرارة، أو تدفق موائع. تقوم الفكرة الأساسية على تقسيم الشكل الهندسي أو المجال الفيزيائي إلى عناصر صغيرة متصلة بعقد، بحيث يمكن تقريب سلوك كل عنصر بدوال رياضية بسيطة، ومن ثم تجميع هذه الحلول للحصول على السلوك الكامل للنظام. تسمح هذه الطريقة بالتعامل مع الهياكل متعددة المواد والمعقدة، وتطبيق شروط حدية وابتدائية متنوعة بدقة، ما يجعلها مناسبة لمحاكاة سيناريوهات واقعية قبل تنفيذ التصميم الفعلي[29].

بعد حل المعادلات العددية الناتجة عن كل عنصر، تعرض النتائج باستخدام برامج المعالجة توفر طرق عرض متقدمة مثل الهياكل السلكية، الأسطح المتساوية القيمة، الحقول المتجهة، والتشوهات الحركية. كما يمكن إنتاج رسوم متحركة تفاعلية وأفلام ثلاثية الأبعاد لمراقبة تطور الظواهر الفيزيائية مع الزمن، وهو أمر مفيد جدا في فهم سلوك النظام بشكل شامل. تسمح هذه الإمكانيات للمحللين والمهندسين بتقييم الأداء، تحسين التصميم، واكتشاف نقاط الضعف قبل التصنيع الفعلي. بفضل هذه المرونة والدقة، أصبحت طريقة العناصر المحددة واحدة من الأدوات الأساسية في الهندسة الحديثة، وتستخدم على نطاق واسع في هياكل الابنية، والسيارات، والطائرات، والسفن، والطاقة، والعديد من التطبيقات العلمية والصناعية[29].

2.11.2 المحاكاة المستمرة

تركز المحاكاة المستمرة (Continuous Simulation) على نمذجة الأنظمة التي تتغير حالتها بشكل سلس ودائم مع مرور الزمن، باستخدام معادلات جبرية أو تفاضلية أو فرقية. هذا النوع من المحاكاة يسمح بدراسة ديناميكيات الأنظمة الفيزيائية أو البيولوجية التي تتطور بشكل مستمر، مثل حركة أنظمة الميكانيكا، تدفق السوائل، أو التغيرات البيئية. مثال واضح على المحاكاة المستمرة هو نموذج المنافسة بين مجموعتين من الكائنات الحية، المعروف بنموذج المفترس والفرائس الذي وضعه فيتو فولتيرا. في هذا النموذج، تعتمد أعداد المفترسات على توفر الفرائس كمصدر للغذاء، فإذا نما عدد المفترسات بسرعة كبيرة يقل عدد الفرائس، ما يؤدي إلى جوع المفترسات، وعندما ينخفض عدد المفترسات يزداد عدد الفرائس، ما يؤدي إلى علاقة متذبذبة يمكن تحليلها رياضياً باستخدام المشتقات الجزئية. تستخدم المحاكاة المستمرة أحياناً بالتزامن مع أنظمة الرسم بمساعدة الحاسوب لتوضيح تغيرات النظام عبر الزمن، وتقديم تصور بصري لديناميكياته المعقدة، مما يجعلها أداة فعالة لفهم الأنظمة الديناميكية وتوقع سلوكها في المستقبل[28].

3.11.2 محاكاة الأحداث المنفصلة

تتميز محاكاة الأحداث المنفصلة (Discrete Event Simulation) بكونها تركز على تغير حالة النظام عند وقوع أحداث محددة، بينما يمر الوقت بين هذه الأحداث دون حدوث أي تغير ملحوظ في النظام. تستخدم هذه المحاكاة لدراسة الأنظمة التي تتفاعل فيها الكيانات مع الموارد أو الخدمات عند وقوع أحداث معينة، مثل أنظمة الطوابير في البنوك أو مراكز الخدمة، أو خطوط الإنتاج في المصانع. على سبيل المثال، يمكن محاكاة نظام صراف آلي حيث يصل العملاء في أوقات متفاوتة، ينتظرون في طابور إذا كان الجهاز مشغولاً، ثم يتلقون الخدمة ويغادرون. من خلال هذه المحاكاة، يمكن جمع بيانات عن أقصى عدد للعملاء في الطابور، متوسط وقت الانتظار، ونسبة الوقت الذي يكون فيه الجهاز قيد الاستخدام، مما يتيح للمصممين تقييم أداء النظام واتخاذ القرارات المناسبة، مثل إضافة أجهزة جديدة أو تعديل أوقات الخدمة لتقليل الازدحام. كما يمكن لمحاكاة الأحداث المنفصلة دمج حالات الذروة أو التغيرات الموسمية في معدل وصول العملاء، ما يجعلها أداة مرنة وفعالة لتحليل الأنظمة الواقعية المعقدة قبل تطبيق أي تغييرات عملية[28].

4.11.2 محاكاة مونت كارلو

يمكن أن يكون نموذج المحاكاة حتمياً أو عشوائياً بطبيعته. ففي النموذج الحتمي تكون جميع المتغيرات (المدخلات والمخرجات) محددة وغير عشوائية، بينما في النموذج العشوائي يوجد متغير واحد على الأقل يتسم بالطابع الاحتمالي. وتعد محاكاة مونت كارلو من أبرز أساليب المحاكاة العشوائية، إذ تعتمد أساساً على توليد عينات عشوائية لاستخدامها في تحليل الظواهر المختلفة. ظهرت الأفكار الأولى لمحاكاة مونت كارلو من خلال تجربة بوفون الخاصة بإسقاط إبرة على سطح مقسم بخطوط متوازية لحساب قيمة π. أما التطبيق الفعلي للمحاكاة فقد قدم عام 1930 أثناء دراسة انتشار النيوترونات، وقد صاغ جون فون نيومان مصطلح "مونت كارلو" خلال أربعينيات القرن العشرين، تحديداً في فترة الحرب العالمية الثانية[30].

تستخدم محاكاة مونت كارلو في معالجة المشكلات التي يصعب تمثيلها بنماذج رياضية دقيقة، أو التي يتعذر الحصول على حلول تحليلية مباشرة لها. وتعتمد هذه الطريقة على تحديد توزيعات احتمالية للمتغيرات غير المؤكدة في النظام المدروس، ومن ثم توليد أعداد عشوائية وفق تلك التوزيعات لمحاكاة سلوك النظام. لذلك تعد محاكاة مونت كارلو أسلوباً إحصائياً يعتمد على التكرار العددي بدلاً من الحلول التحليلية المباشرة. وتستخدم نتائج هذه المحاكاة في مجالات متعددة مثل تحليل المخاطر، ودراسات الجدوى، والتنبؤات، وتقييم الأداء. كما تعد أداة مهمة في حساب التكاملات المعقدة وتقدير القيم العددية للمسائل التي يصعب حلها بالطرق التقليدية[30].

5.11.2 المحاكاة القائمة على الوكلاء

تستخدم النمذجة القائمة على الوكلاء (Agent-Based Modeling) لمحاكاة السلوكيات والتفاعلات المختلفة في أنظمة النقل، مثل الإدراك والاستدلال واتخاذ القرارات، وتمكين الوكلاء من تنفيذ أفعال متعددة ضمن بيئة حركة مرورية معقدة. وقد استخدمت هذه النماذج على نطاق واسع في تخطيط وإدارة حركة المرور، وإدارة الازدحام، والتحكم في إشارات المرور، لاستكشاف التعقيد، الترابطات، وأنماط التطور الهيكلي في البيئة الحضرية[31].

تعتمد هذه النماذج على تمثيل الكيانات غير المتجانسة ودراسة الديناميكيات الناشئة من خلال نمذجة السلوكيات التفاعلية للوكيل، كما توفر أدوات المحاكاة القائمة على الوكلاء اختصارا لتطوير النماذج دون الحاجة لبرمجة مطولة. وتتيح دمج خوارزميات التحسين لحل مشاكل مثل اختيار وسيلة النقل المثلى أو تخصيص الأسطول، مع إمكانية المحاكاة التكرارية لتقدير المدخلات الوسيطة لدالة

الهدف، ما يزيد من موثوقية النتائج وفعاليتها. ورغم هذه المزايا، لا يزال تصميم وتنفيذ النماذج القائمة على الوكلاء في دراسات المرور بحاجة لمزيد من البحث، خاصة فيما يتعلق بتمثيل قدرة الوكلاء على التعلم والتكيف، وبناء نماذج هجينة متعددة المقاييس لتلبية متطلبات المحاكاة متعددة الأبعاد وتحقيق نتائج دقيقة وموثوقة[31].

6.11.2 المحاكاة الديناميكية

تعد المحاكاة الديناميكية للنظم (Dynamic Simulation)) منهجية تحليلية تهدف إلى فهم التفاعلات المعقدة بين الأنظمة الفرعية المتشابكة داخل نظام معين، من خلال التركيز على السلوك الديناميكي للنظام ككل. تم تطوير هذه المنهجية في الستينيات، وبدأ تطبيقها في إدارة الموارد المائية في أواخر السبعينيات، وازدادت أهميتها مع تزايد التعقيد الناتج عن العوامل المناخية والاجتماعية والاقتصادية والبيئية[32].

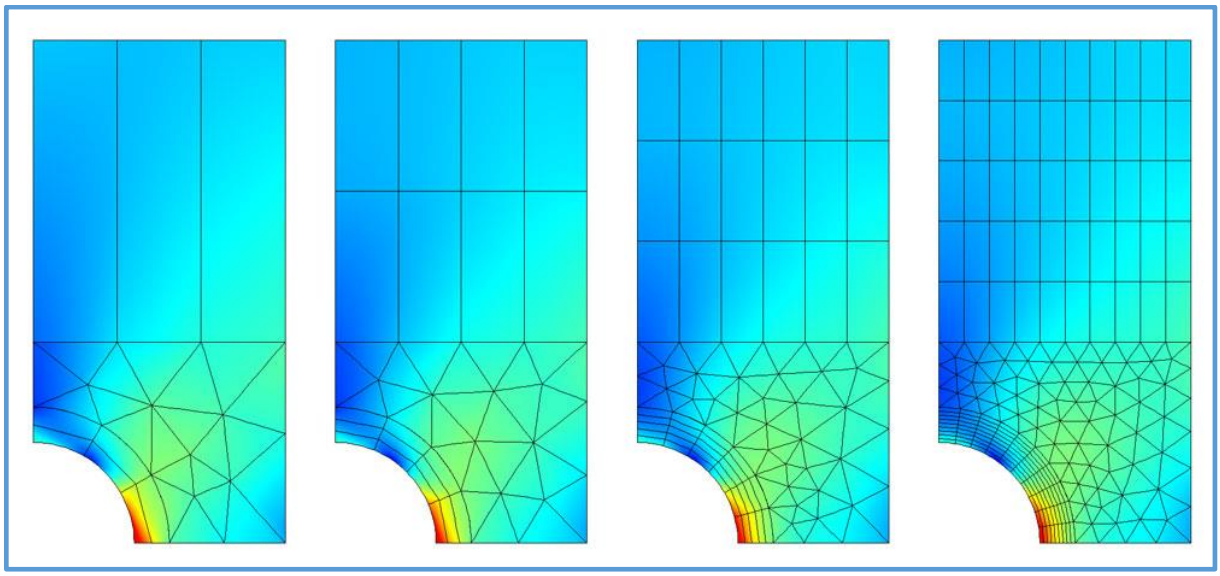
تتيح المحاكاة الديناميكية للنظم التعرف على العلاقات السببية والتغذيات الراجعة بين مكونات النظام المختلفة، مما يساعد صانعي القرار على تقييم تأثير السياسات المختلفة وتوقع النتائج غير المرغوبة المحتملة. كما توفر هذه المنهجية إطارًا شاملاً يمكن من خلاله دمج العمليات الهيدرولوجية والاجتماعية والاقتصادية والبيئية في نموذج واحد، مع إمكانية اختبار السيناريوهات المختلفة والإجراءات الإدارية المتنوعة[32].

7.11.2 محاكاة الفيزياء متعددة المجالات

تعتبر نمذجة الفيزياء متعددة المجالات أداة أساسية لفهم وتحليل الأنظمة الفيزيائية المعقدة التي تتضمن أكثر من نوع واحد من الظواهر الفيزيائية، مثل التدفق الحراري، وديناميكيات الموائع، والاهتزازات الهيكلية، والتفاعلات بين المواد. تبدأ عملية النمذجة عادة بانشاء شبكة عددية تمثل المجال الفيزيائي محل الدراسة. تقوم الشبكة بتقسيم المجال إلى عناصر صغيرة، سواء كانت سداسية أو رباعية أو ثلاثية الأبعاد، بحيث يمكن حل المعادلات الحاكمة على كل عنصر بدقة. ويجب أن تكون هذه الشبكة قادرة على تمثيل الهندسة الواقعية للمجال الفيزيائي بشكل كامل، مع مراعاة التوزيع المحلي للعناصر لضمان دقة التحليل[33].

تعتمد جودة نتائج النمذجة متعددة الفيزياء بشكل مباشر على معايير الشبكة العددية او ما يطلق عليها اسم "مش" (Mesh)، بما في ذلك حجم العناصر، ونسبة العرض إلى الارتفاع، وتوزيع العقد، واتصالها. فعند زيادة دقة الشبكة عن طريق تقليل حجم العناصر أو زيادة عددها، تقترب نتائج التحليل

التدريجي من الحل الحقيقي للمشكلة، ويصبح التقارب العددي أكثر ثباتاً، كما موضح في الشكل (2-9). ومع ذلك، يجب أن يكون المحلل حذراً من أن زيادة دقة الشبكة قد تزيد أيضاً من متطلبات الذاكرة والحوسبة، وقد تؤثر خصائص العناصر المختارة على سرعة التقارب واستقرار الحل العددي، لذلك ينصح بتقييم الشبكة بعناية، مع مراعاة العلاقة بين دقة الشبكة ومتطلبات المعالجة الزمنية وحجم البيانات[33].



الشكل(2-9): تاثير تغيير دقة الشبكة (Mesh) في المحاكاة، حيث ان زيادة الدقة يقرب نتائج التحليل الى الحل الحقيقي للمشكلة التي تم محاكاتها[34].

تلعب الشروط الحدودية والشروط الأولية دوراً حاسمًا في عملية النمذجة، حيث تربط النموذج العددي بالبيئة الواقعية. ففي تحليل تدفق الموائع، تحدد شروط الحدود سرعات التدفق والضغط عند المداخل والمخارج، بينما تتحكم الشروط الأولية في الحالة الابتدائية للمتغيرات في التحليلات العابرة. ويجب أن تكون شروط الحدود مطبقة بشكل يعكس الواقع الفيزيائي لتجنب تشوه النتائج أو حدوث تدرجات عالية غير مرغوبة. وقد أظهرت التجارب أن تطبيق الأحمال على مناطق صغيرة جداً أو عقد محددة فقط يؤدي إلى نتائج غير دقيقة، بينما التوزيع المعقول للأحمال على الأسطح أو الحواف يعكس بدقة سلوك النظام[33].

يتم حل المعادلات الحاكمة عادة باستخدام طرق عددية تكرارية، حيث تعطي هذه الطرق تقريباً متدرجاً للحل الدقيق. تعتمد هذه الحلول على إدخال حل أولي تقريبي، ثم تحسينه تدريجياً حتى يحقق

التقارب، وهو الحالة التي تصبح فيها جميع المعادلات الحاكمة متوازنة ورضاها ضمن الحدود المقبولة. ومن المهم أن يراقب المحلل المقاييس العددية للتحقق من استقرار الحل[33].

بعد الحصول على الحل العددي، تأتي مرحلة المعالجة اللاحقة، والتي تشمل تحليل النتائج، ومقارنة النتائج المحسوبة بالقياسات التجريبية، واستخراج المؤشرات المهمة، وتحديد مدى موثوقية التنبؤات. تتيح هذه المرحلة أيضا اكتشاف العلاقات بين المتغيرات وتقييم جودة الشبكة والتحقق من صحة النموذج. وتساعد أدوات إدارة المحاكاة في تنظيم البيانات ومعالجتها بكفاءة، مما يوفر الوقت والتكلفة ويزيد من فعالية العمل التحليلي[33].

أن دقة وموثوقية النتائج تعتمد بشكل رئيس على تصميم الدقيق للشبكة العددية، وتطبيق الشروط الحدودية الواقعية، واختيار طرق الحل العددية المناسبة. ومن الضروري أن يكون المحلل على دراية بهذه العوامل، وأن يجمع بين المعرفة النظرية والخبرة العملية لضمان أن النماذج التنبؤية دقيقة وفعالة، مع مراعاة التوازن بين الدقة الحسابية ومتطلبات الوقت والذاكرة[34].

الفصل الثالث

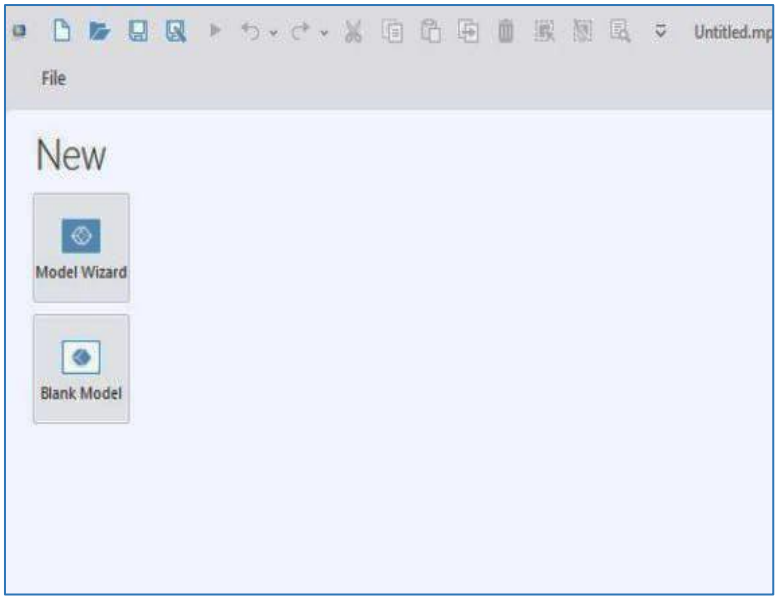
الجزء العملي

1.3 المقدمة

يتضمن هذا الفصل شرحاً تفصيلياً لطريقة الوصول إلى الواجهة الأساسية لبرنامج كومسول COMSOL ذي الفيزياء المتعددة، والخطوات المتبعة في إعداد نموذج مضخة صوتية للموائع الدقيقة، ابتداءً من إنشاء تصميم النموذج وتحديد الخصائص الفيزيائية والمواد، مروراً بعملية توليد الشبكة العددية (Mesh) ، وانتهاءً بتحديد نوع الدراسة وتشغيل الحل العددي. كما يتناول الفصل عرض النتائج المستحصلة من المحاكاة ومناقشتها بصورة علمية دقيقة، مع تحليل توزيع المتغيرات الفيزيائية مثل الضغط، السرعة، والمجال الصوتي داخل القناة الدقيقة. ويهدف هذا الفصل إلى التحقق من صحة النموذج الرياضي من خلال المقارنة العددية، وفهم آلية عمل المضخة الصوتية وتأثير الموجات الصوتية على حركة المائع داخل الأنظمة الميكروية.

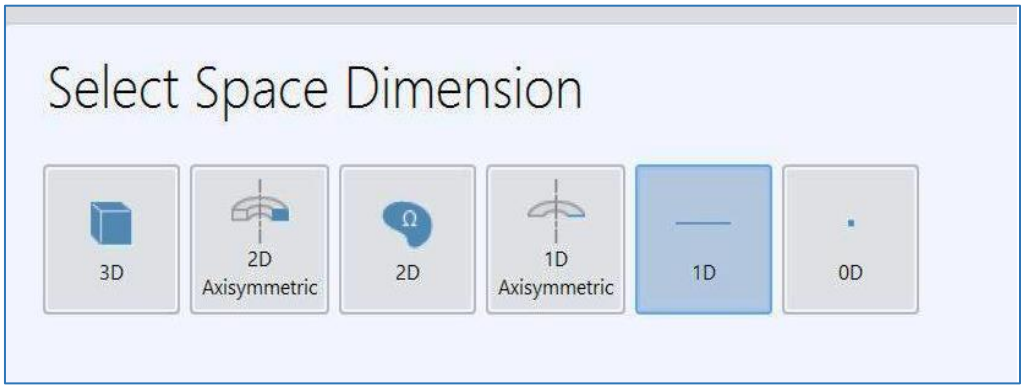
2.3 الية الوصول الى الواجهة الأساسية لبرنامج كومسول

عند تشغيل البرنامج تظهر نافذة البدء التي تمثل نقطة الانطلاق لإنشاء نموذج جديد كما موضح في الشكل (3-1). تتيح هذه النافذة خيارين رئيسيين هما: إما البدء من خلال أداة الإعدادات الموجهة (Model Wizard) التي توفر خطوات منظمة لاختيار أبعاد النموذج ونوع الفيزياء والدراسة، أو إنشاء نموذج فارغ (Blank Model) يمنح المستخدم حرية كاملة في ضبط جميع الإعدادات يدوياً. ويفضل في الدراسات الفيزيائية ذات التخصصات المتداخلة استخدام أداة (Model Wizard) لما توفره من تسلسل منطقي يقلل من احتمالية الخطأ أثناء الإعداد.



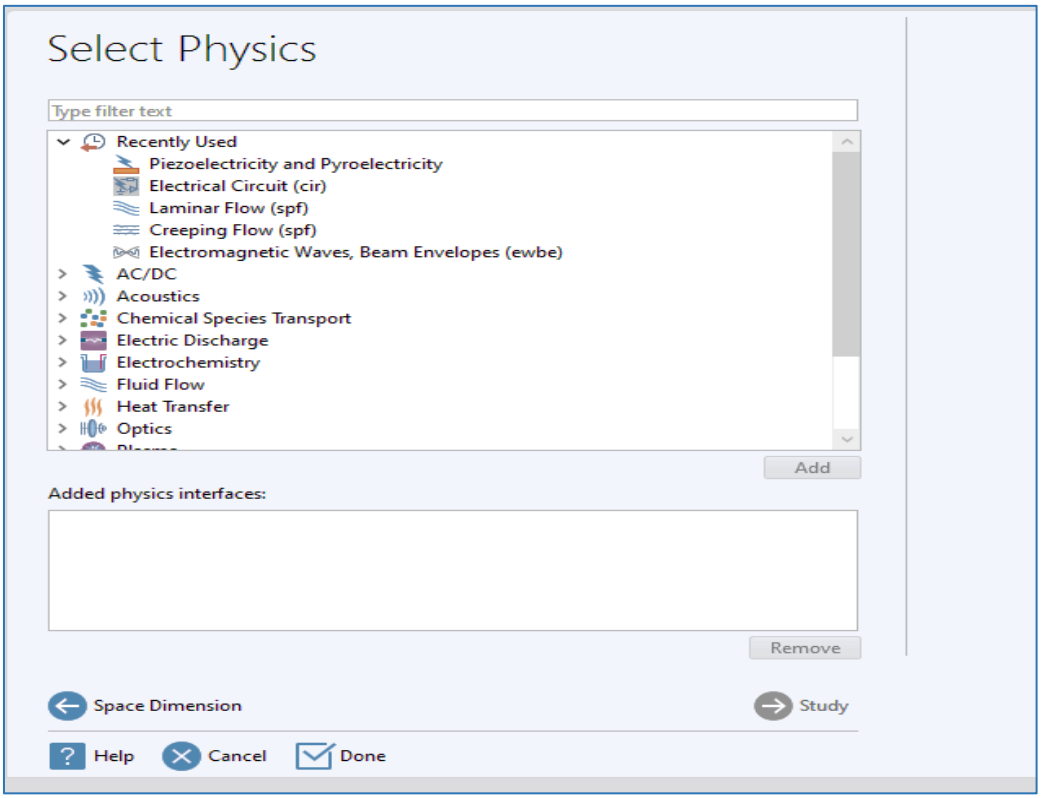
الشكل (3-1):الوجهة الأولى لبرنامج كومسول COMSOL.

تبدأ عملية إنشاء النموذج بتحديد الابعاد الهندسية المناسبة لطبيعة المسألة، إذ يتيح البرنامج عدة خيارات، والموضحة في الشكل (3-2)، والتي تشمل النماذج ذات الابعاد الصفرية (0D)، والأحادية البعد (1D)، والثنائية البعد (2D)، والثنائية ذات التماثل المحوري (2D Axisymmetric)، إضافة إلى النماذج ثلاثية الأبعاد (3D). ويعتمد اختيار البعد على طبيعة الظاهرة الفيزيائية ومدى تعقيد التوزيع المكاني للمتغيرات، حيث يوفر النموذج ثلاثي الأبعاد تمثيلاً كاملاً وأكثر دقة، في حين تسهم النماذج المبسطة ذات الابعاد الاقل في تقليل المتطلبات الحاسوبية والازمنة اللازمة لاجراء مثل هكذا عمليات محاكاة.



الشكل (3-2): نافذة تحديد ابعاد النظام المطلوب دراستها.

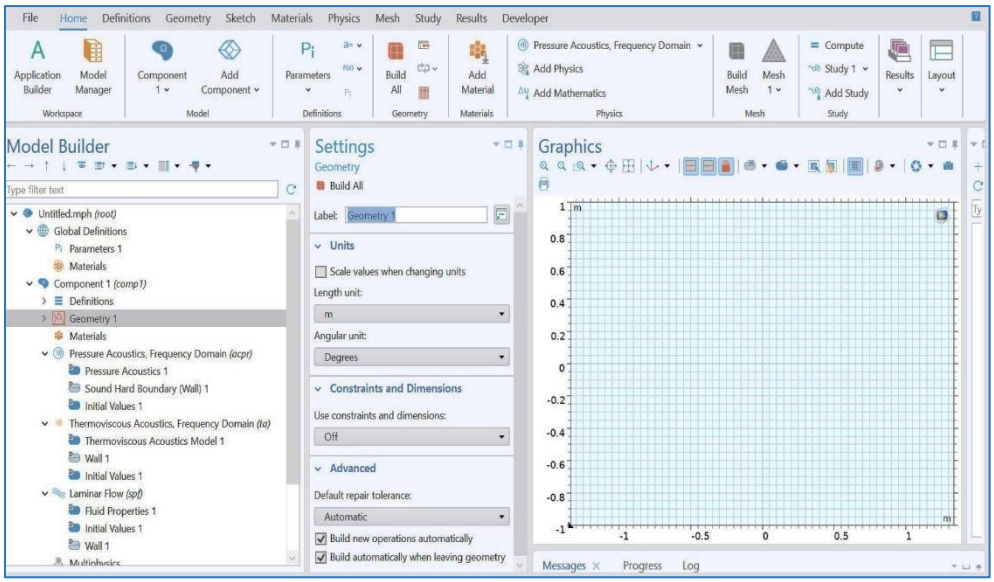
عقب تحديد البعد الهندسي، يتم الانتقال إلى مرحلة اختيار المجال الفيزيائي المناسب للمحاكاة المطلوبة وذلك من خلال نافذة الخيار (Select Physics)، الموضحة في الشكل (3-3)، والتي تعد من أهم مراحل الإعداد، إذ يتم من خلالها تحديد المعادلات الحاكمة للظاهرة المدروسة، سواء كانت تتعلق بالموائع، أو انتقال الحرارة، أو المجالات الصوتية، أو غيرها من الظواهر المتداخلة. ويتيح البرنامج إمكانية دمج أكثر من فيزياء ضمن نموذج واحد، مما يحقق مفهوم الاقتران متعدد الفيزياء (Multiphysics Coupling).



الشكل (3-3): وجهة اختيار نوع الفيزياء المناسبة للمحاكاة.

بعد اختيار الفيزياء المطلوبة، يتم تحديد نوع الدراسة (Study Type)، والتي تحدد طبيعة الحل العددي المراد تنفيذه. ومن بين الخيارات المتاحة الدراسات المستقرة (Stationary) التي تفترض ثبات المتغيرات مع الزمن، والدراسات المعتمدة على الزمن (Time Dependent) التي تأخذ في الاعتبار تطور المتغيرات الفيزيائية مع مرور الزمن، إضافة إلى أنواع أخرى بحسب طبيعة المسألة.

عند إتمام هذه الخطوات، يتم الانتقال إلى الواجهة الأساسية للبرنامج، والتي تتكون من ثلاث اجزاء رئيسية مترابطة كما موضح في الشكل (3-4). تتمثل الأولى في نافذة (Model Builder) وتقع على يسار الواجهة الرئيسية، وهي تعرض شجرة النموذج وتضم جميع مكوناته من هندسة ومواد وفيزياء وشبكة عددية ونتائج. أما النافذة الثانية والتي تقع في يمين الواجهة، فهي نافذة العرض الرسومية (Graphics Window) التي تستخدم لمعاينة النموذج وتمثيل النتائج بصرياً. في حين تستخدم النافذة الثالثة (Settings Window)، والتي تقع في وسط الواجهة، لضبط الإعدادات التفصيلية لكل عنصر يتم اختياره ضمن شجرة النموذج. ومن خلال هذا التنظيم الهيكلي للواجهة، يوفر البرنامج بيئة عمل متكاملة تتيح للمستخدم بناء النموذج الفيزيائي بصورة منهجية، وضبط معاييره، وتنفيذ الحل العددي بكفاءة عالية، تمهيداً لاستخراج النتائج وتحليلها في المراحل اللاحقة من الدراسة.



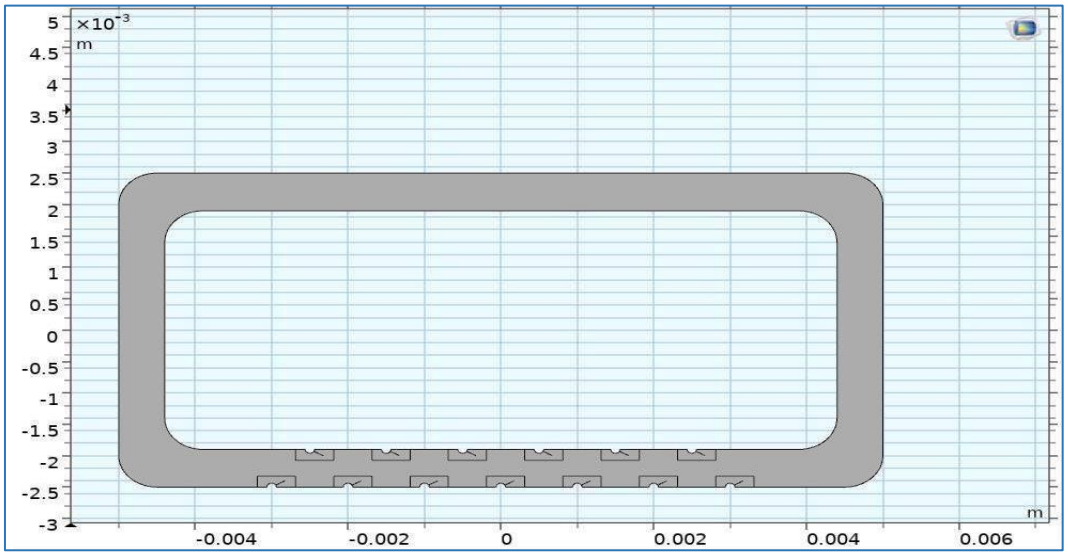
الشكل (3-4): الواجهة الرئيسية لبرنامج كومسول COMSOL.

3.3 طريقة اجراء محاكاة المضخة الصوتية للموائع الدقيقة

في هذا الجزء من الفصل، سيتم تنفيذ الخطوات الأساسية لنمذجة وتحليل سلوك ماء محصور بضغط جوي قياسي (1atm) داخل قناة انبوبية مغلقة مستطيلة الشكل تحتوي على 13 نتوء موزعة بشكل متعاقب في اعلى واسفل القناة السفلية من الانبوب. وقد استخدم لذلك برنامج كومسل (COMSOL Multiphysics) للمحاكاة العددية متعددة الفيزياء، بهدف دراسة توزيع الضغط الناتج عن الإثارة الصوتية عند استخدام تردد اهتزازي مقداره (2 MHz) يميل بزاوية مقدارها (45^0) مع المحور السيني (اي مائلة الى يمين الانبوب السفلي). وكانت الخطوات المستخدمة كالاتي:

1. من قائمة File يتم اختيار New لإنشاء نموذج جديد.
2. بعد ذلك، يتم النقر المزدوج على خيار (Model Wizard) لفتح معالج الإعدادات الموجهة، ومن خلاله يتم تحديد البعد الهندسي للنموذج، حيث يتم اختيار النموذج ثنائي الأبعاد.
3. يتم الانتقال إلى نافذة اختيار نوع الفيزياء (Select Physics) لاختيار المجال الفيزيائي المطلوب.، وثم يتم اختيار قسم (Acoustics)، ومنه يتم تحديد (Pressure Acoustics)، ثم اختيار (Pressure Acoustics, Frequency Domain)، وبعدها يتم الضغط على إضافة (Add) لاضافة صوتيات الضغط في مجال التردد إلى النموذج.
4. اضافة الى ذلك، ومن قسم الصوتيات (Acoustics) مرة اخرى، يتم اختيار (Thermoviscous Acoustics)، ثم الخيار صوتيات الحرارة اللزجة في مجال التردد (Thermoviscous Acoustics Frequency Domain)، والضغط على إضافة (Add) وذلك لاضافة هذا المجال الى الفيزياء السابقة التي تمت اضافتها.
5. بعد ذلك، ومن خلال نافذة اختيار نوع الفيزياء (Select Physics) مرة اخرى، يتم اختيار تدفق الموائع (Fluid Flow)، ومنه يتم تحديد التدفق أحادي الطور (Single-Phase Flow)، ثم نحدد التدفق الصفائحي (الطبقي) ((Laminar Flow (spf) ، والضغط على (Add) لإضافته إلى النموذج.
6. مرة اخرى ومن خلال نافذة (Select Study)، يتم اختيار دراسات معدة مسبقاً لبعض واجهات الفيزياء (Preset Studies for Some Physics Interfaces)، ثم تحديد مجال التردد (Frequency Domain)، وبعدها يتم الضغط على تم (Done) لإكمال إعداد الدراسة والتوجه الى الواجهة الرئيسية للبرنامج.
7. من الواجهة الأساسية، يتم النقر المزدوج على شريط الأدوات الهندسية (Geometry)، ثم اختيار إدراج التسلسل (Insert Sequence)، حيث ستظهر بعد ذلك مكتبة التطبيقات الخاصة بالنماذج، و يتم اختيار ملف (mph) المتعلق بالدراسة بالنقر المزدوج عليه والذي يحتوي على مواصفات الشكل الانبوبي المستطيل والتي هي: الطول (10mm) والعرض (5mm) وقطر الانبوب (0.6mm) ويحتوي على (13) نتوء في الضلع الاسفل من الانبوب وبواقع (6) في اعلى الانبوب و(7) في اسفله ومرتبة باسلوب متعاقب وليس متقابل. بعد ذلك يتم الضغط على (Build All) لإنشاء النموذج الهندسي بالكامل. ويمكن تعديل الشكل الهندسي للنموذج بسهولة من خلال تغيير قيمة أحد الأبعاد في قائمة المعاملات Parameters، وسيؤدي ذلك إلى تحديث الهندسة تلقائياً.

8. من نافذة منشئ النماذج (Model Builder)، يتم اختيار Component1 (comp1)، ثم (Geometry1)، حيث يظهر الشكل الهندسي للنموذج في نافذة العرض الرئيسية للبرنامج، كما موضح في الشكل (3-5).



الشكل (3-5): الشكل الهندسي المستخدم في محاكاة مضخة الموائع الدقيقة.

9. لتنظيم القيم الخاصة بالأبعاد الهندسية للنموذج، يتم ادخال تسمية تعريفية للنموذج الهندسي من خلال نافذة منشئ النماذج (Model Builder) ثم النقر على (Global Definitions)، ثم اختيار المعاملات (Parameters 1) ومن نافذة الإعدادات (Settings)، يتم تعديل حقل التسمية (Label) بكتابة Parameters – Geometry.
10. أما بالنسبة إلى المعاملات النموذج العامة، فيتم ادخالها من خلال (Home) في شريط الأدوات الرئيسي ثم اختيار (Pi Parameters)، ثم الضغط على إضافة (Add) ثم (Parameters)، ونافذة الإعدادات (Settings)، يتم تعديل حقل التسمية (Label) بكتابة Parameters.
11. من قسم المعاملات (Parameters) ، يتم اختيار (Load from File) لتحميل ملف معاملات (parameters.txt) المتعلق بالنموذج من مجلد مكتبة التطبيقات (Application Library).
12. بعد ذلك، يتم تعريف الحدود الخارجية للنموذج من خلال الانتقال إلى شريط التعريفات (Definitions) واختيار (Explicit)، ومن نافذة الإعدادات (Settings) الخاصة بها (Explicit)، يتم كتابة Exterior Boundaries في حقل (Label)، ثم يتم تحديد حدود الادخال وذلك من خلال قسم كيانات الإدخال (Input Entities) ثم تحديد خيار جميع نطاقات

الحدود (All Domains). بعدها يتم تحديد من قسم كيانات الاخراج Output Entities يتم اختيار الحدود المجاورة (Adjacent Boundaries) من قائمة المخرجات، وذلك لغرض تعريف جميع الحدود الخارجية المرتبطة بالمجالات المعرفة في النموذج بصورة صريحة.

13. من شريط أدوات المواد (Materials) يتم اختيار إضافة مادة (Add Material) لفتح نافذة إضافة المواد، ومن الشجرة الظاهرة يتم اختيار (Built-in > Water, liquid)، ثم الضغط على زر الإضافة (Add to Component) لاضافة الماء السائل إلى مكونات النموذج الحالي، وبعد ذلك يتم إغلاق نافذة المواد ليتم ربط الخصائص الفيزيائية للماء بالنموذج.

14. بعدها يتم الدخول على نافذة الإعدادات (Settings) الخاصة بصوتيات الضغط ضمن مجال التردد ((Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr))، ثم يتم تحديد المجال (Domain Selection)، ثم الضغط على مسح التحديد (Clear Selection) واختيار (Domain 1) فقط.

15. بعد ذلك، يتم النقر على صوتيات الضغط (Pressure Acoustics1) من خلال منشئ النماذج (Model Builder) ضمن الخيار Component 1 (comp1) > Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr)، ومن نافذة الاعدادات يتم تحديد قسم نموذج صوتيات الضغط (Pressure Acoustics Model)، واختيار (Thermally conducting and viscous) من قائمة (Fluid Model) لتمثيل تأثير التوصيل الحراري واللزوجة في الوسط المائع.

16. من خلال شريط الادوات (Physics) ثم اختيار الحدود (Boundaries)، ثم الخيار (Thermoviscous Boundary Layer Impedance) لتحديد حدود طبقة الاعاقة الناتجة من اللزوجة الحرارية، بعدها ومن خلال نافذة اعداداتها، يتم تحديد (Boundary Selection)، ومن قائمة التحديد (Selection) يتم اختيار جميع الحدود (All Boundaries) . ثم من قسم خصائص الموائع (Fluid Properties)، ومن قائمة مادة الموائع (Fluid material)، يتم تحديد المادة ((Water, liquid (mat1))، وذلك لربط خصائص الطبقة الحدودية الحرارية اللزجة بخصائص الماء السائل المعرفة سابقاً في النموذج.

17. من شريط الفيزياء (Physics)، يتم النقر فوق خيار الحدود (Boundaries)، ثم اختيار الخيار (Thermoviscous Boundary Layer Impedance)، وفي نافذة الاعدادات لها يتم تغيير التسمية إلى (Thermoviscous Boundary Layer Impedance – Actuation) وذلك في حقل التسمية (Label) لتمييزه عن الشرط السابق. بعد ذلك، يتم تحديد الحدود 1 و4 و111 و112 فقط لتطبيق حدود اللزوجة الحرارية عليها. بعدها وبالتحديد من قسم خصائص الموائع (Fluid Properties)، من قائمة مادة مائعة (Fluid material)، يتم اختيار الماء السائل

((Water, liquid (mat1)، ثم في قسم الحالة الميكانيكية (Mechanical Condition) يتم اختيار السرعة (Velocity) بعدها يتم تعريف متجه السرعة بحيث يكون المركب في اتجاه x مساويًا للقيمة (act_v0) ، وفي اتجاه y مساوياً للصفر (0)، ويستخدم هذا الشرط الحدي لتمثيل عملية التحفيز من خلال فرض سرعة محددة على الحدود المختارة.

18. بعد ذلك، يتم إعداد واجهة الصوتيات اللزجة الحرارية ضمن مجال التردد وذلك من نافذة منشئ النماذج (Model Builder) ضمن المسار Component 1 (comp1) يتم النقر على (Thermoviscous Acoustics, Frequency Domain (ta))، ثم تحديد المجالات من 2 إلى 14 فقط، وذلك لأن هذه الواجهة تستخدم في المجالات التي تحتوي على حواف حادة لتمثيل تأثير الطبقات الحدية الحرارية واللزجة بدقة أعلى.

19. ومن نافذة منشئ النماذج (Model Builder) يتم الانتقال إلى نافذة الإعدادات (Settings) الخاصة بالخيار (Thermoviscous Acoustics, Frequency Domain)، والنقر على قسم التقدير (Discretization) لتوسيع القسم، ثم من قائمة (Element order for pressure) الخاصة بترتيب عناصر الضغط يتم اختيار (Quadratic serendipity)، ومن قائمة ترتيب عناصر السرعة (Element order for velocity) يتم اختيار (Cubic serendipity)، وكذلك من قائمة ترتيب عناصر درجة الحرارة (Element order for temperature) يتم اختيار (Cubic serendipity). ان زيادة رتبة العناصر العددية تعد ضرورية للحصول على تمثيل أكثر دقة لمجالات الصوت، خصوصاً عند نمذجة قوة الجسم الصوتية ضمن اقتران مجال الجريان الصوتي (Acoustic Streaming Domain Coupling)، مما يحسن من دقة النتائج العددية للنموذج.

20. في هذه الخطوة يتم دمج الفيزياء المتعددة المستخدمة في هذا النموذج مع بعضها البعض، حيث من خلال شريط (Physics) يتم اختيار (Multiphysics Couplings) لاقتران الفيزياء المتعددة، ثم (Boundary > Acoustic–Thermoviscous Acoustic Boundary)، ومن نافذة الإعدادات لها يتم تحديد الحدود (Boundary Selection)، ومن قائمة (Selection) يتم اختيار جميع الحدود (All Boundaries)، وذلك لربط واجهة الصوتيات الضغطية مع واجهة الصوتيات الحرارية اللزجة عند جميع الحدود المشتركة بينهما لضمان انتقال التأثيرات الصوتية بصورة متكاملة.

21. بعد ذلك، ومن خلال شريط الادوات (Physics) ثم (Multiphysics Couplings)، ثم الخيار(Domain > Acoustic Streaming Domain Coupling) ثم نافذة الإعدادات لها (Settings)، يتم تحديد قسم الواجهات المقترنة (Coupled Interfaces)، ومن قائمة

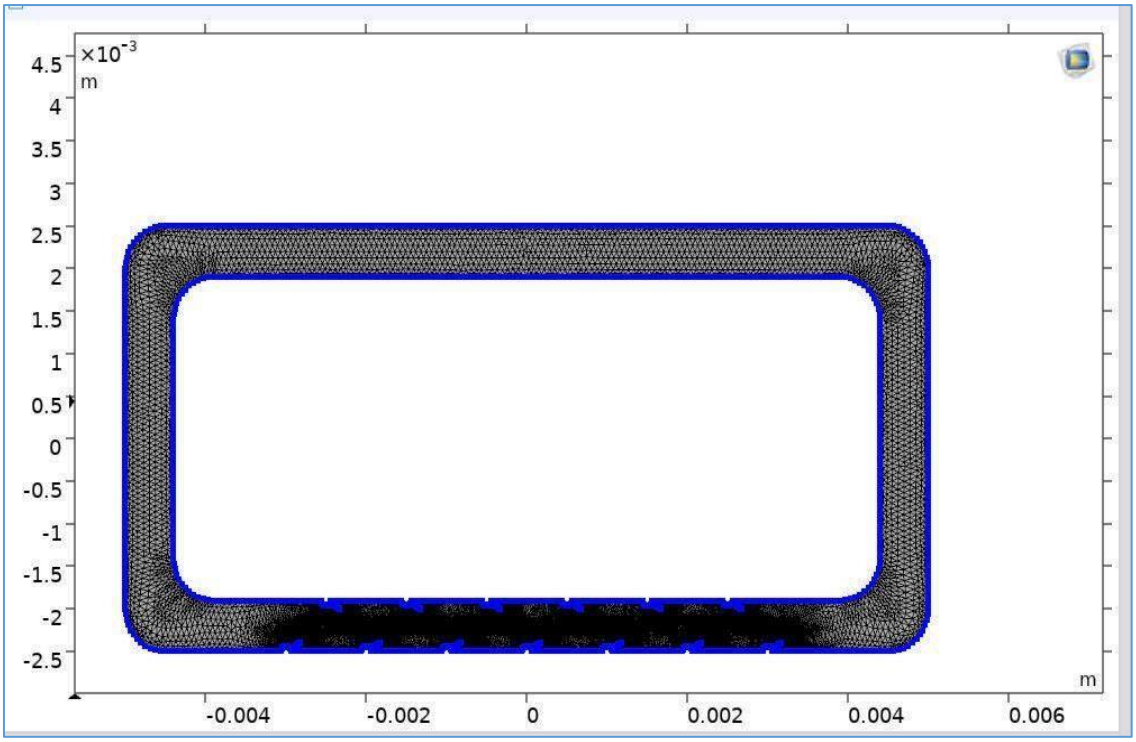
المصدر (Source) يتم اختيار (Thermoviscous Acoustics, Frequency Domain (ta)) ثم يتم تحديد المجال (Domain Selection)، ومن قائمة التحديد (Selection) يتم اختيار جميع المجالات (All Domains) وذلك من اجل تمكين تأثير الجريان الصوتي (Acoustic Streaming) ضمن كامل المجالات المحددة في النموذج.

22. بعد الانتهاء من إعداد الاقترانات، يتم الانتقال إلى إعدادات الجريان الطبقي (الصفائحي) وذلك من خلال نافذة منشئ النماذج (Model Builder) ثم Component 1 (comp1) ثم النقر على الجريان الطبقي (Laminar Flow (spf)) ومن شريط ادوات (Physics) يتم اختيار الخيار (Points) واختيار قيد نقطة ضغط (Pressure Point Constraint)، ثم تحديد النقطة رقم 20 فقط، وذلك لتثبيت مرجع الضغط ومنع حدوث عدم استقرارية عددية أثناء الحل.

23. بعد اكتمال اعداد النموذج، يتم إنشاء الشبكة العددية له وذلك من خلال شريط الادوات (Mesh) ثم اختيار تقسيم النموذج مثلث حر (Free Triangular) لإنشاء شبكة مثلثية حرة. بعد ذلك، يتم النقر بزر الفأرة الأيمن على (Free Triangular1) واختيار الحجم (Size) في نافذة الإعدادات الحجم (Settings)، ثم يتم تحديد الكيان الهندسي (Geometric Entity Selection)، ومن قائمة الكيان الهندسي (Geometric Entity Selection) يتم اختيار (Domain)، ثم تحديد المجالات من 2 إلى 14 فقط. وفي قسم حجم العنصر (Element Size)، ومن قائمة محددة مسبقاً (Predefined) ، يتم اختيار الخيار دقيق للغاية (Extremely fine) للحصول على شبكة دقيقة جداً، بما يضمن تمثيلاً عددياً أكثر دقة لطبقات الحدود اللزجة وتأثيرات الجريان الصوتي داخل النموذج.

24. بعد الانتهاء من إعداد الشبكة، يتم النقر على (Build All) لانشاء الشبكة العددية للنموذج، حيث يظهر توزيع العناصر المثلثية مع تكثيف واضح عند الطبقات الحدية والحواف الحادة، وذلك لضمان الحصول على دقة عددية عالية في تمثيل تأثيرات الجريان الصوتي واللزوجة، وكما هو موضح في الشكل (3-6).

25. وأخيراً، يتم النقر على الخيار (Compute) من شريط الادوات (Study) لبدء تنفيذ عملية الحساب العددي للنموذج واستخراج النتائج.

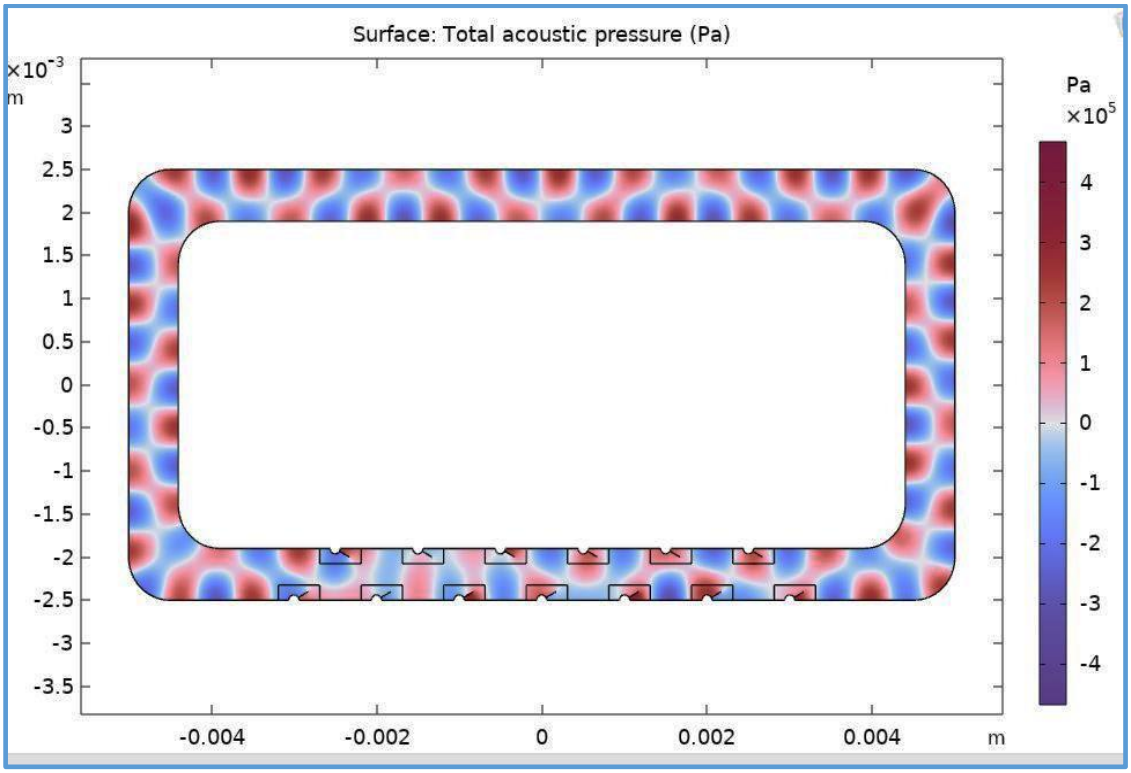


الشكل(3-6): شكل الشبكة العددية لنموذج المضخة الصوتية للموائع الدقيقة الذي تمت محاكاته.

4.3 النتائج والمناقشة

تم تحليل سلوك ماء محصور بضغط جوي قياسي داخل قناة انبوبية مغلقة مستطيلة الشكل تحتوي على 13 نتوء موزعة بشكل متعاقب في اعلى واسفل القناة السفلية من الانبوب. وقد استخدم لذلك برنامج كومسل COMSOL للمحاكاة متعددة الفيزياء، بهدف دراسة توزيع الضغط الناتج عن الإثارة بالاهتزازات الصوتية (Acoustic Vibrations) عند استخدام تردد اهتزازي مقداره (2MHz) ويميل بزاوية مقدارها حوالي (45^0) مع المحور السيني (اي مائلة الى يمين الانبوب السفلي). ولغرض تسهيل تفسير التغيرات داخل المجال المدروس، تم تمثيل النتائج باستخدام مقياس الطيف اللوني بدلاً من القيم العددية المباشرة. وقد تم الحصول على النتائج الاتية:

نتائج توزيع الضغوط داخل الانبوب: يوضح الشكل (3-7) توزيع الضغوط داخل الأنبوب المدروس، حيث تم اعتماد مقياس الطيف اللوني للتعبير عن التغيرات الضغطية، اذ يمثل اللون الأبيض قيمة الضغط المتعادل (0Pa) وهو ما يمثل قيمة الضغط قبل بدأ تشغيل المضخة، اي قبل تفعيل اهتزازات النتوءات داخل النموذج. ويشير اللون الأحمر الى قيم الضغط الموجبة (التضاغط)، والتي تمثل مناطق الضغط المرتفع داخل الانبوب الاعلى من الضغط المتعادل. من جهة اخرى، يدل اللون الأزرق على قيم الضغط السالبة (التخلخل)، والتي تمثل الضغط المنخفض داخل الانبوب الاقل من الضغط.

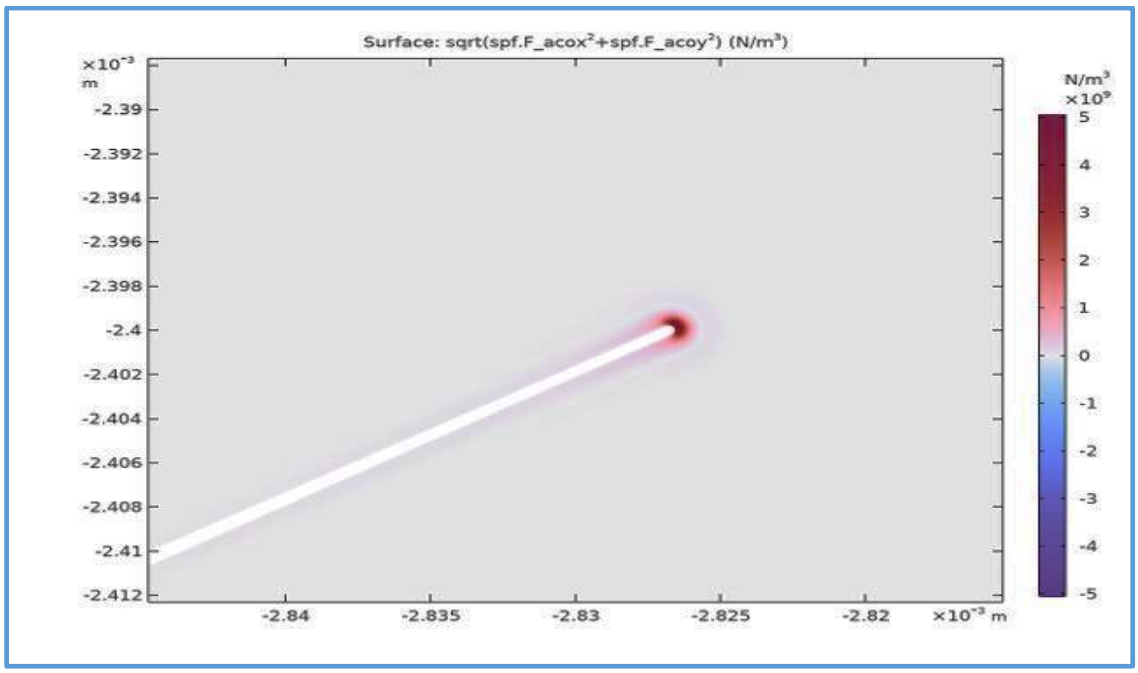


الشكل (3-7): توزيع الضغوط داخل الأنبوب المدروس موضحة بطريقة مقياس الطيف اللوني.

ومن هذه النتائج يمكن ملاحظة وجود مناطق تضاغط مائلة باغلب مناطقها بزاوية ميل مقدارها (45^0) تقابلها مناطق تخلخل مائلة ايضاً بنفس الزاوية وموزعة على طول الأنبوب بشكل متناوب ناشئة نتيجة لتأثير الاهتزازات الصوتية الحركية (Acoustic Vibrations)، اي ان تاثير الاهتزازات الصوتية في الماء وصل الى جميع اجزاء الانبوب. ويدل هذا الامر على ان نوع الاهتزازات كانت ذات تحفيز دوراني وليس اهتزازي خطي مكاني، اذ ان الاهتزازات الخطية المكانية تتسبب بحركة متناظرة على كلا جانبي الانبوب مما يتسبب باضمحلال الضغوط قبل وصولها الى الطرف الاخر من النموذج (الانبوب العلوي). وقد سجلت اعظم قيمة للضغط بحدود ($4.5x10^5Pa$)، اما اصغر قيمة مسجلة للضغط كانت بحدود ($-4.5x10^5Pa$).

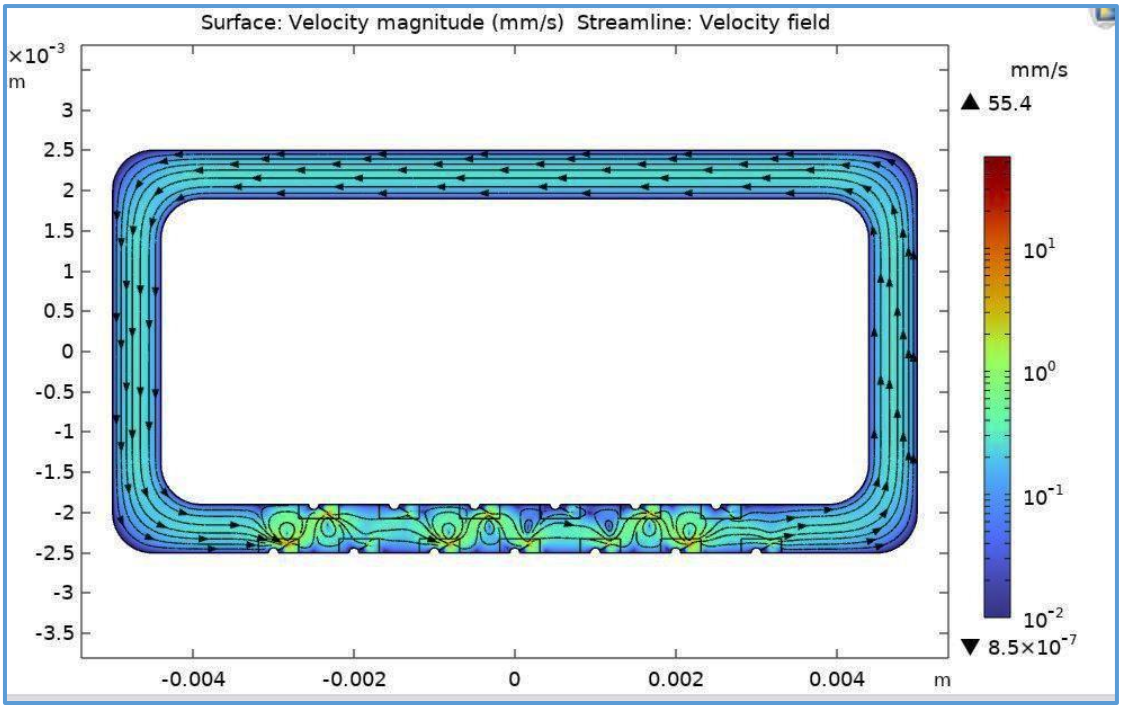
كما يلاحظ ايضاً أن مساحة مناطق التضاغط تقارب مساحة مناطق التخلخل، مما يشير إلى أن محصلة التغير في الضغط داخل النظام تساوي صفراً، وهو ما يعكس حالة من التوازن النسبي في توزيع الضغط داخل الأنبوب. ويمكن تفسير هذا الامر الى نوع التصميم المستخدم والذي هو من النوع المغلق المتصل المعزول عن المحيط والذي يمنع انتقال الضغوط خارج الجدران الجاسئة (Rigid Walls).

نتائج توزيع القوة لوحدة الحجم عند اركان النتوءات: يوضح الشكل (3-8) مخطط توزيع القوة لوحدة الحجم عند اركان احد النتوءات داخل القناة السفلية موضحة بطريقة مقياس الطيف اللوني. ويمكن ملاحظة وجود زاوية ميل للقوة الاهتزازية للنتوءات، كما يمكن ملاحظة ان القيمة العظمى للقوة لوحدة الحجم قد بلغت ($5\times10^{9}N/m^{3}$) عند أطراف النتوءات، مما يدل على أن هذه المناطق تمثل المصدر الرئيسي لتوليد القوة المؤثرة على الجريان داخل القناة.



الشكل (3-8): توزيع القوة لوحدة الحجم عند اركان احد النتوءات داخل القناة السفلية موضحة بطريقة مقياس الطيف اللوني.

نتائج توزيع سرع الجريان داخل الانبوب: يوضح الشكل (3-9) توزيع سرع جريان الماء داخل الأنبوب المدروس، حيث تم اعتماد مقياس الطيف اللوني للتعبير عن التغيرات في السرع. وقد لوحظ عند الجزء الايمن والعلوي والايسر من الانبوب أن سرع الجريان تبلغ قيمتها العظمى في وسط القناة، حيث تصل إلى (0.7mm/s)، في حين تنخفض عند المناطق المحاذية للجدران لتصل إلى قيمتها الصغرى البالغة ($8.5x10^{-7}mm/s$)، والتي تمثل ايضاً القيمة الصغرى في كافة انحاء الانبوب. ويمكن تفسير هذا التباين في السرعة إلى طبيعة الجريان الصفائحي، حيث تكون السرعة أعلى مايكون في وسط الأنبوب نتيجة انخفاض تأثيرات الاحتكاك مع المحيط، وأقل مايكون عند الجدران بسبب تأثيرات قوى التلاصق والتي تسبب زيادة في الاحتكاك مع جزيئات الجدران.



الشكل (3-9): توزيع سرع جريان الماء داخل الأنبوب المدروس موضحة بطريقة مقياس الطيف اللوني.

من جهة اخرى، يلاحظ حدوث انخفاض نسبي لسرعة الجريان عند اركان الانبوب والتي لها القياسات الاكبر للاقطار داخل الأنبوب مقارنة ببقية الاجزاء. ويمكن تفسير ذلك وفقاً لمعادلة الاستمرارية والتي تبين العلاقة العكسية بين مساحة المقطع العرضي للانبوب وسرعة الجريان فيه، اي ان زيادة مساحة المقطع (زيادة قطر الانبوب) ادت إلى انخفاض في سرعة الجريان.

اما عند الجزء السفلي من الانبوب، فيلاحظ وجود مناطق متناوبة من السرع العالية والمنخفضة، اذ وصلت السرع الى قيمة عظمى مقدارها (55.4mm/s) اما القيمة الصغرى فكانت مماثلة للقيم الصغرى عند المناطق المحاذية للجدران والتي بلغت ($8.5x10^{-7}$mm/s)، حيث تسهم هذه الفروقات في تعزيز عملية الضخ الصوتي الدقيق داخل الأنبوب. ويعود هذا التغير في السرع إلى التغيرات في الضغط الناتجة عن الاهتزازات الصوتية (Acoustic Vibrations)، إذ تكون السرعة في أعلى قيمها في المناطق التي تشهد تأثيراً أكبر للاهتزاز.

وبصورة عامة، تشير النتائج إلى أن تاثيرات الاهتزازات الصوتية (Acoustic Vibrations) قادرة على توليد تدفق مستقر داخل القنوات الدقيقة للموائع (الميكروفلويدية)، وذلك من خلال القوة المائلة الناتجة عن هذه الاهتزازات الصوتية، مما يؤدي إلى تكوين نمط جريان منتظم وفعال داخل النظام.

5.3 مقترحات للدراسات المستقبلية

1. إجراء محاكاة مماثلة تستخدم فيها نتوءات مصنوعة من مواد مهتزة ذات أنواع مختلفة لتحديد المادة التي توفر استقراراً ميكانيكياً أعلى واستجابة أسرع.
2. إجراء محاكاة تربط بين الصوتيات والحرارة وديناميكا الموائع لدراسة تأثير "التدفق الصوتي الحراري" الناتج عن الاهتزازات عالية التردد على كفاءة عملية الضخ.
3. إجراء محاكاة لتصميمات هندسية مختلفة لانابيب الضخ (مثل الأشكال البيضوية أو المتدرجة) للوصول إلى حالة الرنين المثالي التي تضمن أقصى سرعة تدفق بأقل استهلاك للطاقة.
4. إجراء محاكاة لقدرة المضخة الصوتية على خلط سوائل مختلفة الكثافة داخل القنوات الدقيقة من خلال توليد دوامات صوتية تزيد من تجانس الخليط.
5. إجراء محاكاة لدراسة قدرة الموجات الصوتية داخل المضخة على فصل أو توجيه الجسيمات الحيوية (مثل الخلايا) بناءً على حجمها وكثافتها أثناء عملية الجريان.

المصادر

1. I. J. Karassik,"Pump Handbook", 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 2008.

2. S. I. Yiannopoulos et al., "Evolution of Water Lifting Devices (Pumps) over the Centuries Worldwide," Water, vol. 7, no. 9, pp. 5031–5060, 2015.

3. G. A. Waters and G. A. Aggidis, "Over 2000 years in review: Revival of the Archimedes screw from pump to turbine", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 51, pp. 497–505, 2015.

4. S. Robinson, "Simulation: The Practice of Model Development and Use", 3rd edition, Bloomsbury Academic, New York, 2025.

5. M. Vajdi et al., "A Review on the COMSOL Multiphysics Studies of Heat Transfer in Advanced Ceramics", Journal of Composites and Compounds, vol. 2, no. 1, pp. 35–43, 2020.

6. D. W. Pepper, and J. C. Heinrich, "The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications with MATLAB®, MAPLE, and COMSOL", 3rd ed., CRC Press (Taylor & Francis Group), Boca Raton, 2017.

7. L. De Mol and M. Bullynck, "The History of Computing in the History of Technology and the History of Mathematics," Revue de Synthèse, vol. 139 issue (3-4), pp. 361-380, 2018.

8. R. W. Pryor, "Multiphysics Modeling Using COMSOL®: A First Principles Approach", Jones & Bartlett Publishers, Sudbury, 2009.

9. N. M. Salih et al., "Numerical Simulation of Water Flow Velocity for Microfluidic Application Using COMSOL Multiphysics", Advanced Materials Research, vol. **925**, pp. 651–655, 2014**.**

10. H. Low, E. Kadri, and W. Abas, “Computational Fluid Dynamics Modelling of Microfluidic Channel for Dielectrophoretic BioMEMS Application”, The Scientific World Journal, vol. **2014**, Article ID 961301, 2014. https://doi.org/10.1155/2014/961301.

11. M. Islam, and Y. Tsui, “Quasi-3D Modeling and Efficient Simulation of Laminar Flows in Microfluidic Devices”, Sensors, vol. **16**, no. 10, Article 1639, 2016. https://doi.org/10.3390/s16101639.

12. H. Musharaf, U. Roshan, A. Mudugamuwa, Q. Trinh, J. Zhang, and N. Nguyen, “Computational Fluid–Structure Interaction in Microfluidics,” Micromachines, vol. **15**, no. 7, Art. 897, 2024. https://doi.org/10.3390/mi15070897

13. N. Bakuova, S. Toktarkan, D. Dyussembinov, D. Azhibek, A. Rakhymzhanov, K. Kostas, G. Kulsharova, “Design, Simulation, and Evaluation of Polymer-Based Microfluidic Devices via Computational Fluid Dynamics and Cell Culture ‘On-Chip’”, Biosensors, vol. **13**, no. 7, Article 754, 2023. https://doi.org/10.3390/bios13070754.

14. D. D. Gray, "A First Course in Fluid Mechanics for Civil Engineers", Water Resources Publications, Colorado, 2000.

15. م. محمود أحمد عمري،" أساسيات في علم الموائع"، مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع، عمان 2014.

16. C. P. Kothandaraman, and R. Rudramoorthy, "Fluid Mechanics and Machinery", New Age International Ltd., New Delhi, 2007.

17. Y. A. Çengel, and J. M. Cimbala, "Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications", McGraw-Hill, New York, 2006.

18. J. Mathieu, and J. Scott, "An Introduction to Turbulent Flow", Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

19. R. L. Mott, and J. A. Untener, "Applied Fluid Mechanics", 7th ed., Pearson Press, Boston, 2015.

20. I. K. Dagkinis, and A. I. Glykas, "Pumps", Eugenides Foundation, Athens, 2017.

21. E. F. E. Nossir, M. Elkelawy, H. Alm-Eldin Bastawissi, and M. O. Elsamadony, “A Comprehensive Review and Background on Centrifugal Pump Performance Under Multiphase Flow and Varying Operating Conditions”, Pharos Engineering Science Journal, vol. **2**, no. 1, pp. 117–128, 2025.

22. A. F. Ghidaoui, and D. J. Brown, "A Review of Industrial Pumps for Viscous and Non-Newtonian Slurry Transport," Int. J. Thermofluids, vol. **30**, 101450, 2025.

23. P.Woias, “Micropumps: Past, Progress and Future Prospects,” Sensors and Actuators B: Chemical, vol. **105**, pp. 28–38, 2005.

24. J. Friend, and L. Y. Yeo, "Microscale Acoustofluidics: Microfluidics Driven Via Acoustics and Ultrasonics," Rev. Mod. Phys., vol. **83**, no. 2, pp. 647–694, 2011.

25. M. F. Chaplin, "Water: Its Importance to Life," Biochemistry and Molecular Biology Education, vol. **29**, pp. 54-59, 2001.

26. M. A. Helmy, S. Das, and P. A. Levkin, "Water as the Often Neglected Medium at the Interface between Materials and Biology," Nature Communications, vol. **13**, 3928, 2022.

27. K. A. Sharp, “Water: Structure and Properties,” In: Encyclopedia of Life Sciences, John Wiley & Sons, Chichester, 2001.

28. R. McHaney, “Understanding Computer Simulation”, Ventus Publishing, Colorado, 2009.

29. G. R. Liu, and S. S. Quek, "The Finite Element Method: A Practical Course", 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2013.

30. S.Bandyopadhyay, and R. Bhattacharya, "Discrete and Continuous Simulation: Theory and Practice", CRC Press, Boca Raton, 2014.

31.J. Huang, Y. Cui, L. Zhang, W. Tong, Y. Shi, and Z. Liu, “An overview of Agent-Based Models for Transport Simulation And Analysis,” Journal of Advanced Transportation, vol. **2022**, 1252534, 2022.

32. T. D. Phan, E. Bertone, and R. A. Stewart, “Critical Review of System Dynamics Modelling Applications for Water Resources Planning and Management,” Cleaner Environmental Systems, vol. **2**, pp. 1–18, 2021,

33. M. Peksen, “Multiphysics Modeling: Materials, Components, and Systems”, Academic Press, San Diego, 2018.

34. W. B. J. Zimmerman, "Multiphysics Modeling With Finite Element Methods", World Scientific Publishing Company, Hackensack, 2006.