

Modeling a laboratory channel used for training on controlling temperature and flow

Dr. Bilal Chiha*
Isam Asaad**

(Received 24 / 10 / 2017. Accepted 22 / 4 / 2018)

□ ABSTRACT □

Modeling is crucial in all design processes, since the construction of a model which simulates the process implemented on the ground allows for implementations and simulations of tests which may cut substantial costs in case of errors not observed by the designer during the design phase. This paper presents the detailed steps to build two mathematical models in Lab Volt 3522, the first for a duct shaped like Venturi tube used to train students on controlling airflow within it, and can be easily modified to be used with any required gas or liquid. The second is a model of a room of known size and dimensions, located within the designed duct, used to train students on controlling air temperature within it. This paper also shows the steps necessary to design the required PID controller to adjust the airflow value and temperature to match the required value.

Key Words: Modeling, simulation, airflow, Venturi tube, temperature, PID microcontroller.

*Assistant professor, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Doctorate Student, Department of Computers and Automatic Control Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

بناء نموذج رياضي لقناة مخبرية تُستخدم للتدريب على التحكم بدرجة الحرارة والتدفق

د. بلال عبد الكريم شيجا*

عصام محمود اسعد**

(تاريخ الإيداع 24 / 10 / 2017. قُبِلَ للنشر في 22 / 4 / 2018)

□ ملخص □

تشغل عملية النمذجة أهمية كبيرة في جميع عمليات التصميم، ذلك لأن بناء نموذج تجريبي يحاكي العملية المراد تنفيذها على أرض الواقع يتيح إمكانية تنفيذ اختبارات ومحاكاة قد توفر كلفةً ماديةً كبيرةً في حال وجود أخطاء لم يتم مراعاتها من قِبَل المصمم أثناء مرحلة التصميم. يعرض هذا البحث الخطوات التفصيلية لبناء نموذجين رياضيين موجودين ضمن اللوحة التدريبية Lab Volt 3522، الأول لقناة بشكل أنبوب فينتوري، تُستخدم لتدريب الطلاب على التحكم بتدفق الهواء ضمنها، يمكن تعديلها بسهولة لتُستخدم مع أي غاز أو سائل مطلوب. أما الثاني فهو نموذج لحجرة ذات حجم وأبعاد معروفة ضمن القناة المصممة، وتُستخدم لتدريب الطلاب على التحكم بدرجة حرارة الهواء ضمنها. كما يعرض هذا البحث الخطوات اللازمة لتصميم متحكم PID المطلوب لضبط قيمة تدفق الهواء ودرجة الحرارة لتوافق القيمة المطلوبة.

الكلمات المفتاحية: نمذجة، محاكاة، تدفق الهواء، أنبوب فينتوري، درجة حرارة، متحكم PID.

* أستاذ مساعد - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم هندسة الحاسبات والتحكم الآلي - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

يهتم علم التحكم الآلي بشكل أساسي بضبط قيمة متغير فيزيائي معين لتكون أقرب ما يمكن لقيمة معينة تدعى Set point، ومن بين هذه المتغيرات الفيزيائية سنناقش عمليتي التحكم بقيمة تدفق الهواء ودرجة الحرارة اللتين تشاهدان في كثير من الأنظمة مثل أنظمة التكييف المنزلي HVAC (Heating, Ventilating and Air Conditioning) والأفران الصناعية Industrial Furnaces. وكأمثلة على هذه التطبيقات نجد عملية التحكم بعمل نظام HVAC لضبط درجة حرارة غرفة من خلال استخدام تابع نقل مصمم مسبقاً موافق لهذه الغرفة ضمن بيئة MATLAB Simulink، حيث يبدأ الباحث باستخدام متحكم On-Off مع إعاقة، ثم يقوم باستخدام متحكم PID معايير بطريقة Skogestad سيعطي أداءً أفضل من المتحكم السابق من حيث صغر مطال الاهتزاز حول القيمة المرغوبة عند الاستقرار [2,1]، بينما نشاهد مقارنة بين أداء متحكم PID معايير بطريقة Ziegler-Nichols وأداء متحكم ضبابي Fuzzy Controller ذو توابع عضوية مثلثية Triangular Membership Functions، ويظهر هذا البحث سرعة الوصول لحالة الاستقرار باستخدام المتحكم الضبابي مقارنةً مع المتحكم PID، لكن نقطة ضعف المتحكم الضبابي تكمن في كونه يتعامل مع مجالات قيم ضبابية وليس القيم الحدية، الأمر الذي يفرض تسامحاً صغيراً في قيمة الخطأ عند حالة الاستقرار لكنه بالمقابل يعطي مرونةً وتسامحاً بالدقة من حيث النموذج الرياضي للعملية المراد التحكم بأدائها [3]، ونجد تصميم نموذج رياضي صندوقي لعملية تحكم بعمل نظام HVAC، واستخدام هذا النموذج لتحليل أداء النموذج الفعلي الموافق، حيث تقدّم عملية بناء هذا النموذج ومحاكاته باستخدام بيئة MATLAB Simulink نظرةً جيدة عن أداء النظام الفعلي مع فهم نقاط ضعفه وطريقة معالجتها. أما بالنسبة لعملية التحكم، فقد تم استخدام طريقة Ziegler-Nichols لمعايرة بارامترات متحكم PID يُستخدَم للتحكم بكمية الهواء المتدفق ودرجة حرارة هذا الهواء ضمن وحدة سكنية محددة الأبعاد والمواصفات وتقع ضمن ظروف جوية (أحمال) محددة [4]، ومثال آخر هو بناء نموذج رياضي لمجفف شعر Hair Dryer [5]، وذلك بالاعتماد على اللوحة التدريبية PT360 Process Trainer، حيث تم العمل على بناء النموذج الرياضي الموافق للوحة المكونة بشكل أساسي من سخان ومروحة وقناة أسطوانية مستقيمة ذات مقطع ثابت. يدرس هذا النموذج ارتفاع درجة الحرارة وفقاً لتدفق الهواء الناتج عن دوران المروحة والاستطاعة الكهربائية المقدّمة للسخان المُستخدَم، وأخيراً نعرض بناء نموذج لعملية انتقال الحرارة والرطوبة بين مجموعة من الأبنية في رومانيا باستخدام برنامج المحاكاة IBPT (International Building Physics Toolbox) المتخصص بمحاكاة انتقال الحرارة والرطوبة بين أبنية يمكن توزيعها بالشكل المطلوب [6]، مع العلم أن هذا البرنامج يعتمد على بيئة MATLAB Simulink، وبعد بناء هذا النموذج ناقش البحث استهلاك الطاقة الكهربائية المطلوبة لضبط درجة الحرارة والرطوبة على قيمة مطلوبة بما يتوافق مع المعيار Thermal Comfort.

سنقوم في هذا البحث بالاستفادة من وجود اللوحة التدريبية ذات الرقم 3522 من شركة Lab Volt في مخبر الروبوت ضمن كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين، والتي توفر مجموعة من التجارب للتحكم بتدفق الهواء عبر أنبوب فينتوري Venturi Tube والتحكم بدرجة الحرارة ضمن حجرة معلومة الأبعاد، حيث سيتم العمل في هذا البحث على بناء نموذج رياضي موافق لهذه اللوحة، وبالتحديد بناء نموذج رياضي لقناة بشكل أنبوب فينتوري وحجرة معلومة الأبعاد تقع ضمنها، مما يساعد على إجراء تجارب للتحكم بتدفق الهواء وبدرجة الحرارة، وذلك مع تصميم متحكم PID الذي سيتم استخدامه لضبط هذين المتغيرين الفيزيائيين على القيمة المرغوبة، ومن ثم التأكد من

صحة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال مقارنتها مع النتائج المتاحة في النشرات الفنية المرفقة مع اللوحة التدريبية.

أهمية البحث وأهدافه:

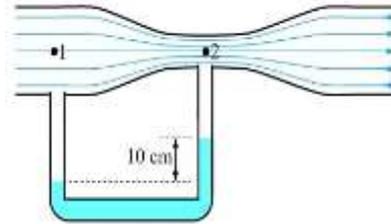
تكمن أهمية هذا البحث بشكل أساسي في توضيح الخطوات التفصيلية لتصميم نموذج رياضي لقناة بشكل أنبوب فينتوري

وحجرة تقع ضمنها، يمكن استخدامه للتدريب على التحكم بتدفق الهواء وبدرجة حرارة الهواء ضمن الحجرة، وهما عمليتان مستخدمتان بشكل واسع في أنظمة التحكم الصناعي وأنظمة التكيف، وتظهر الحاجة الأساسية لاستخدام هذين النموذجين في كونهما يعطيان صورةً قريبة عن النموذج الفيزيائي الحقيقي، الأمر الذي يمكن مصمم نظام التحكم من تقدير وتقييم أداء النظام وإجراء التعديلات المطلوبة عليه قبل التنفيذ العملي للنموذج، مما يوفر من كلفة الصيانة أو إعادة البناء للنظام المطلوب في حال وجود نقاط ضعف لم تتم مراعاتها أثناء مرحلة التصميم.

طرائق البحث ومواده:

1) المبدأ المُستخدم للتحكم بتدفق الهواء عبر قناة بشكل أنبوب فينتوري:

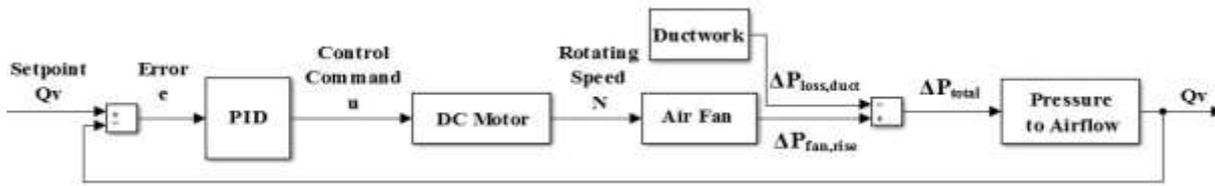
سنقوم في هذا الجزء من البحث ببناء نموذج لقناة بشكل أنبوب فينتوري سيتم التحكم بتدفق الهواء عبرها، وهي باختصار عبارة عن أنبوب يحتوي على جزء متضيق (الشكل (1.3) [7]) يتم الاستفادة منه لإحداث فرق في ضغط الهواء بين منطقتين مختلفتين بالمقطع والاستفادة من هذا الفرق لحساب تدفق الهواء عبر الأنبوب.



الشكل (1.3): أنبوب فينتوري Venturi Tube

2. نمذجة عملية التحكم بتدفق الهواء المدروسة:

يظهر في الشكل (2.3) المخطط الصندوقي لعملية التحكم بتدفق الهواء عبر القناة التي نعمل على بناء النموذج الرياضي الموافق لها، ونلاحظ فيه استخدام متحكم تناسبي تفاضلي تكاملي PID للتحكم بتدفق الهواء عبر أنبوب فينتوري، ويتم التحكم بالتدفق من خلال ضبط سرعة دوران محرك يعمل بالتيار المستمر، ليتم تحريك الهواء من مدخل إلى مخرج الأنبوب وفقاً لحركة الشفرات (المروحة) المركبة على المحرك المُستخدم، وسيولد عن حركة المحرك (المروحة) فرق الضغط $\Delta P_{fan,rise}$.



الشكل (2.3): المخطط الصندوقي لعملية التحكم بتدفق الهواء عبر القناة المصممة في هذا البحث.

يقوم المحرك بتحريك الهواء عبر الأنبوب الموضح في الشكل (3.3) [8,7] الذي يحوي اختلافاً بمساحات المقاطع، وبالتالي ستتأثر حركة الهواء بشكل ومساحة المناطق المختلفة من هذا الأنبوب، وسيظهر هذا التأثير بشكل ضياعات في قيمة الضغط وفق مايلي:

$$\Delta P_{\text{loss,duct}} = \Delta P_{\text{loss,friction resistance}} + \Delta P_{\text{loss,local resistance}} \quad (1.3)$$

حيث تتكون هذه الضياعات من خلال الاحتكاك مع جدران القناة على طول كل جزء منها $\Delta P_{\text{loss,friction}}$ resistance ومن تغير مقطع القناة $\Delta P_{\text{loss,local resistance}}$ ، وتعطى قيمة فرق الضغط الكلي بالمعادلة التالية:

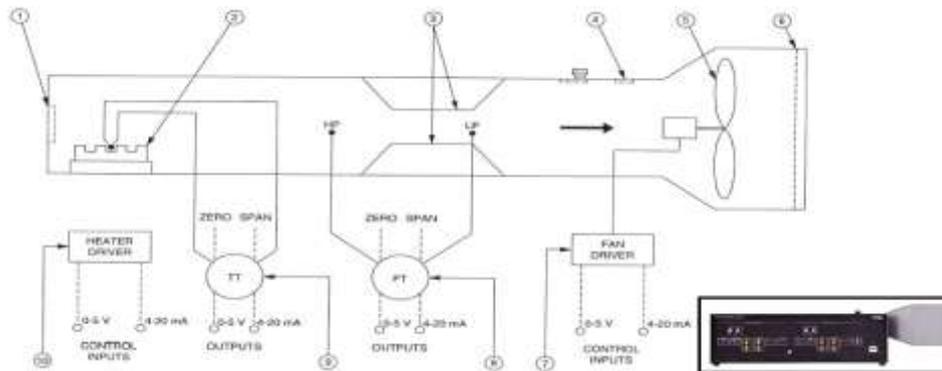
$$\Delta P_{\text{total}} = \Delta P_{\text{fan,rise}} - \Delta P_{\text{loss,duct}} \quad (2.3)$$

وهي تمثل الفرق بين قراءة حساسي الضغط اللذين يتم استخدامهما على أرض الواقع، ليتم بعد حساب هذا الفرق إيجاد قيمة تدفق الهواء عبر الأنبوب باستخدام معادلة برنولي Bernoulli's equation.

3. نمذجة المتحكم التناسبي التفاضلي التكاملي PID:

يتكون المتحكم PID من ثلاثة أجزاء أساسية، وهي الجزء التناسبي Proportional والتفاضلي Derivative

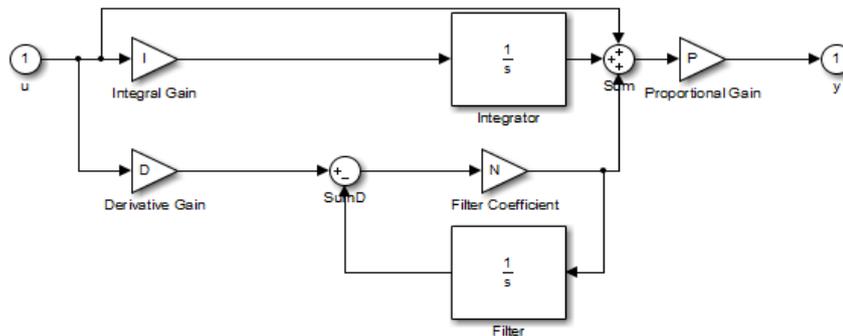
والتكاملي



الشكل (3.3): مخطط تفصيلي لأنبوب فينتوري المستخدم.

Integral، يتم توصيلها مع بعضها وفق الشكل (4.3) [9] الذي يوضح نموذج Simulink للمتحكم المنفذ

باستخدام برنامج Matlab 2016a.



الشكل (4.3): مخطط المتحكم PID المستخدم.

يمكن تلخيص عمل الأجزاء الثلاثة بأن الجزء التناسبي مسؤول عن تصغير قيمة الخطأ التي تمثل الفرق بين القيمة المرغوبة للمتغير المتحكّم به (تدفق الهواء) والقيمة الفعلية التي يتم قياسها إلى قيمة صغيرة، لتكون مهمة الجزء التكاملي إلغاء هذا الخطأ وجعل قيمته تساوي الصفر، أما الجزء التفاضلي فيكون مسؤولاً عن ضبط سرعة الوصول إلى حالة الاستقرار التي يكون عندها قيمة المتغير المتحكّم به مساويةً للقيمة المرغوبة لتدفق الهواء. سنقوم بحساب قيمة معاملات المتحكم PID الثلاثة وهي قيمة معامل التضخيم التناسبي K_P والتضخيم التكاملي K_I والتضخيم التفاضلي K_D باستخدام طريقة Ziegler-Nichols [9,10,11]، ويمكن تلخيص هذه الطريقة وفق الخطوات التاليتين:

(1) استخدام الجزء التناسبي فقط وحساب البارامتر K_u ($K_{ultimate}$)، ويتم ذلك من خلال زيادة قيمة K_P حتى نحصل على اهتزاز دوري في قيمة المتغير المتحكّم به، ويكون لهذا الاهتزاز الدور T_u .

(2) حساب المعاملات K_P و K_I و K_D وفق المعادلات الثلاث التالية [9]:

$$K_P = 0.6 K_u \quad (3.3)$$

$$K_I = 1.2 K_u / T_u \quad (4.3)$$

$$K_D = 3 K_u T_u / 40 \quad (5.3)$$

وباستخدام هذه الطريقة لضبط معاملات المتحكم PID نحصل على استجابة من الشكل Quarter Amplitude Decay، ويكون أمر التحكم الذي يعطيه المتحكم من الشكل:

$$U(S) = E(S) \left[K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right] \quad (6.3)$$

حيث يمكن استخدام مرشح تمرير منخفض مع الجزء التفاضلي، له الثابت الزمني τ ومعامل تضخيم للمرشح في منطقة

التمرير $K_f = 1$ وتابع النقل التالي [12]:

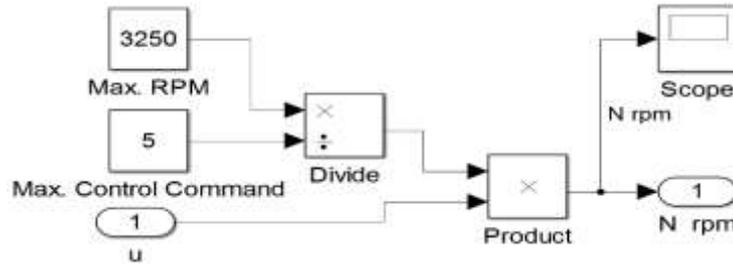
$$F(S) = \frac{K_f}{\tau S + 1} \quad (7.3)$$

حيث $S = -N$ موقع القطب الذي يضيفه مرشح التمرير المنخفض.

4) نمذجة محرك التيار المستمر:

سنعمل على بناء نموذج لمحرك يعمل بالتيار المستمر يحاكي في عمله المحرك المستخدم في اللوحة التدريبية Lab Volt 3522 الموجودة في مخبر الروبوت في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين، والمروحة الموجودة ضمنها هي المروحة Galaxy DC GL12B4 من شركة Comair Rotron [13]، وهي تعمل بجهد مستمر أعظمي قيمته 12V وسرعة دوران أعظمية 3250rpm، مع إمكانية تغيير سرعة الدوران بشكل متناسب خطياً مع قيمة الجهد المستخدمة للتدوير، ولها الأبعاد 127mmx127mmx38.1mm، وإذا علمنا أن أمر التحكم الأعظمي الذي تستقبله اللوحة التدريبية المستخدمة هو $u_{max} = 5V$ ومع وجود دائرة تضخيم ضمن اللوحة سيجعل المروحة تدور بسرعة 3250rpm، يكون نموذج Simulink لمحرك مثالي يعمل بالتيار المستمر يوافق هذه المواصفات كما في الشكل (5.3)، وهو موافق للمعادلة التالية:

$$N = u * \frac{3250}{5} \text{ [rpm]} \quad (8.3)$$



الشكل (5.3): المخطط الصندوقي للمحرك المثالي الموافق للمحرك المستخدم.

توضح المعادلة (8.3) سرعة دوران محرك يعمل بالتيار المستمر بشكل مثالي، لكن الواقع العملي لا يتحقق فيه سرعة الدوران المطلوبة مباشرة أو بشكل لحظي بعد تطبيق قيمة الجهد على المحرك، وذلك يعود بشكل أساسي لوجود عطالة لأجزاء المحرك تؤثر على زيادة ونقصان سرعة الدوران عند تغيير الجهد المطبق على المحرك، وهذا يسبب تأخيراً زمنياً يُعطى في النشرة الفنية للوحة التدريبية المستخدمة [7] بقيمة توافق الثابت الزمني لعملية التحكم بتدفق الهواء Time Constant=1.3sec، أي أن سرعة دوران المحرك يجب أن تكون كما في الشكل (6.3)، ولذلك سنستخدم تابع نقل لنظام من الدرجة الأولى يومّن الثابت الزمني المطلوب كما في الشكل (7.3).

(5) فرق الضغط الذي تولده المروحة $\Delta P_{fan,rise}$:

يتعلق فرق الضغط الذي تولده المروحة بسرعة دوران وقطر شفراتها، وبالتالي قدرتها على تحريك أحجام توافق كتلاً مختلفة من الهواء.

يمكن تجزيء فرق الضغط الكلي الذي تعطيه المروحة (واحدته Pa) إلى جزأين أساسيين، ستاتيكي وديناميكي كما هو موضح في الشكل (8.3) [14] والمعبر عنه من خلال المعادلة التالية [14]:

$$\Delta P_{fan,rise} = \Delta P_{fan,static} + \Delta P_{fan,dynamic} \quad (9.3)$$

ويمكن التعبير عن فرق الضغط الستاتيكي وفرق الضغط الديناميكي والبارامترات اللازمة لحسابهما بالعلاقات التالية:

$$\Delta P_{fan,static} = \frac{1}{2} \rho v_{tip}^2 \psi \quad (a.10.3)$$

$$\Delta P_{fan,dynamic} = \frac{1}{2} \rho v_{avg}^2 \quad (b.10.3)$$

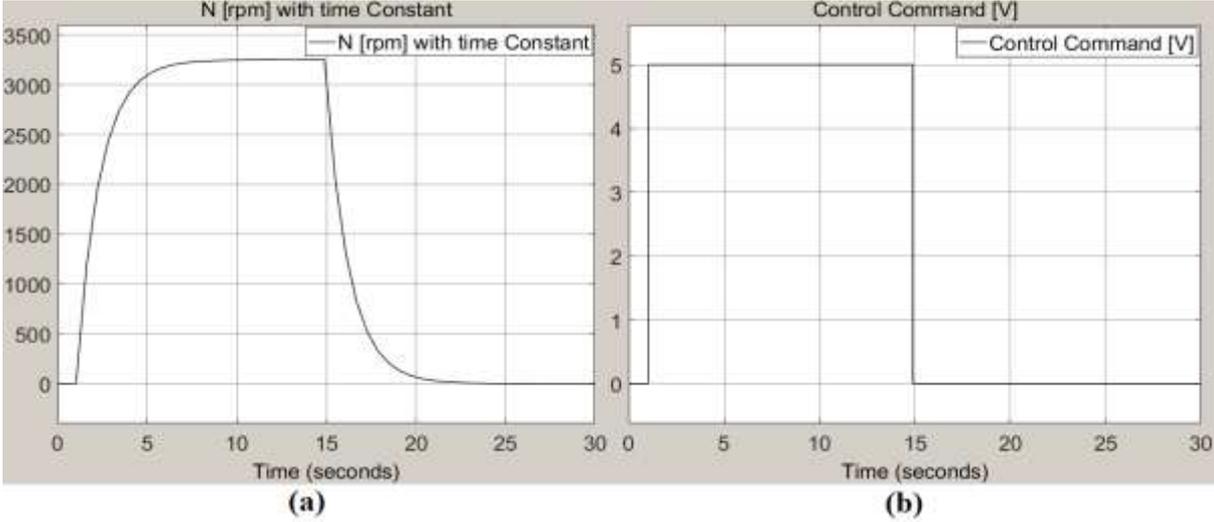
$$\rho = \frac{p}{T_K * R_{specific}} \quad (a.11.3)$$

$$T_K [K] = 273.15 + T [^{\circ}C] \quad (b.11.3)$$

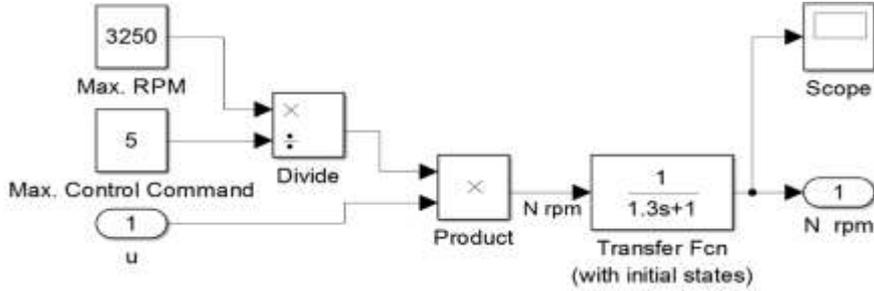
$$v_{tip} = \pi d_{tip} \frac{N}{60} [rpm] \quad (12.3)$$

$$\psi = \frac{\Delta P_{fan,static}}{\frac{1}{2} \rho v_{tip}^2} \quad (13.3)$$

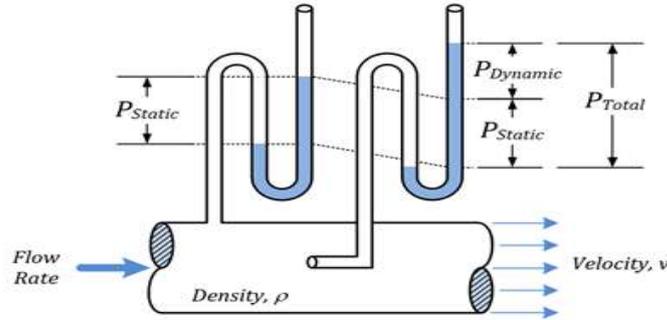
$$v_{avg} = \frac{Q_v}{A_{fan}} = \frac{4Q_v}{\pi d_{fan}^2} \quad (14.3)$$



الشكل (6.3): (a) الاستجابة المطلوبة لسرعة دوران محرك يعمل بالتيار المستمر ذو ثابت زمني 1.3sec. (b) أمر التحكم المُستخدَم لتحقيق الاستجابة الموضحة في الجزء (a).



الشكل (7.3): إضافة الثابت الزمني المطلوب لتحقيق سرعة دوران المحرك المُستخدَم في اللوحة التدريبية.



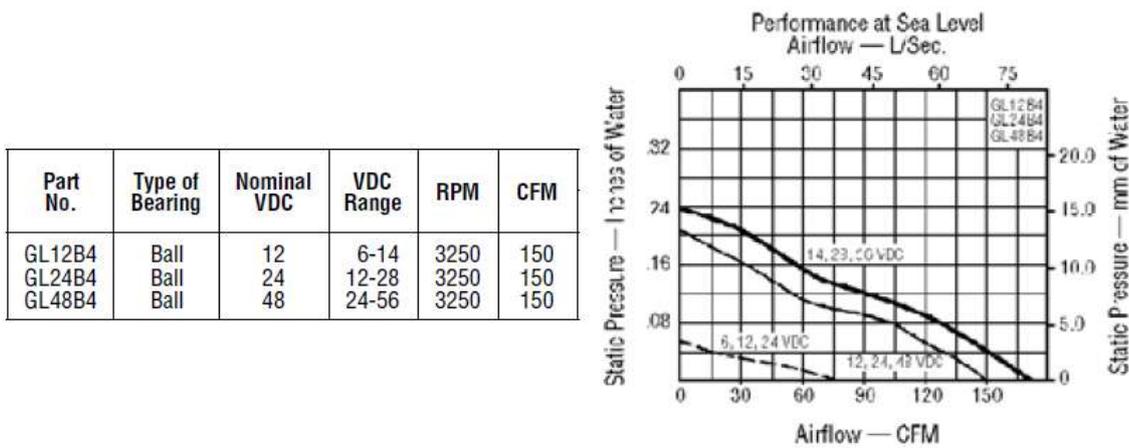
الشكل (8.3): الضغط الديناميكي والضغط الستاتيكي الذي تولده المروحة.

حيث ρ الكتلة الحجمية Mass per Unit Volume للهواء وواحدتها kg/m^3 وتحسب من المعادلة (11.3) [15]، و V_{tip} سرعة دوران شفرات المروحة وواحدتها m/sec وتحسب من المعادلة (12.3) [16,14,4]، و ψ عامل التدفق للمروحة Flow Coefficient وهو ثابت مستقل عن الزمن ويُحسب من المعادلة (13.3) [4] ومنحني مواصفات المروحة الموضح في الشكل (9.3) [13]، أما v_{avg} فهو متوسط سرعة الهواء وواحدته m/sec ويحسب من المعادلة (14.3) [4].

ترتبط الكتلة الحجمية للهواء ρ بقيمة الضغط عند ارتفاع معين وبدرجة الحرارة، وعند استخدام قيمة الضغط عند مستوى سطح البحر $P=101325[\text{Pa}=\text{N/m}^2]$ [17]، ودرجة الحرارة $T=15^\circ\text{C}$ ، واستخدام ثابت الغاز للهواء $R_{\text{specific}}=286.9\text{J/kgK}$ [15,18]، نحصل على الكتلة الحجمية للهواء $\rho=1.225\text{kg/m}^3$ وفق المعادلة (11.3).

وترتبط سرعة دوران شفرات المروحة بعدد دورات محرك التيار المستمر المثبتة عليه والمسافة الفاصلة بين نهايتي شفرتين متناظرتين (تمتلك المروحة المستخدمة أربع شفرات) وقيمتها في المروحة المستخدمة $d_{fan}=d_{tip}=0.122m$ ، وذلك وفق المعادلة (12.3).

أما بالنسبة لعامل التدفق ψ ، فهو ثابت يتم الحصول على قيمته من خلال المعادلة (13.3) [4]، حيث يتم اختيار قيمة معينة لفرق الضغط الستاتيكي الذي تولده المروحة من المنحني المعطى في النشرة الفنية للمروحة [13] الموضح في الشكل (9.3)، واختيار سرعة دوران المروحة الموافقة للقيمة المختارة، وعلى سبيل المثال، عند اختيار قيمة فرق ضغط ستاتيكي $\Delta P_{fan,static}=0.04inH_2O\equiv 9.9536Pa$ سيوافق تدفقاً حجمياً للهواء قيمته $Q_v=15cfm$ $\equiv 0.0071m^3/sec$ وهي توافق سرعة دوران 1333rpm، ويتعويض هذه القيم في المعادلة (13.3) نحصل على معامل تدفق $\psi=0.224$.



الشكل (9.3): منحني عمل المروحة المستخدمة.

وبالنسبة لمتوسط سرعة الهواء v_{avg} ، فيمكن حسابه من المعادلة (14.3) [14]، حيث Q_v التدفق الحجمي Volumetric Flow للهواء وواحدته $[m^3/sec]$.

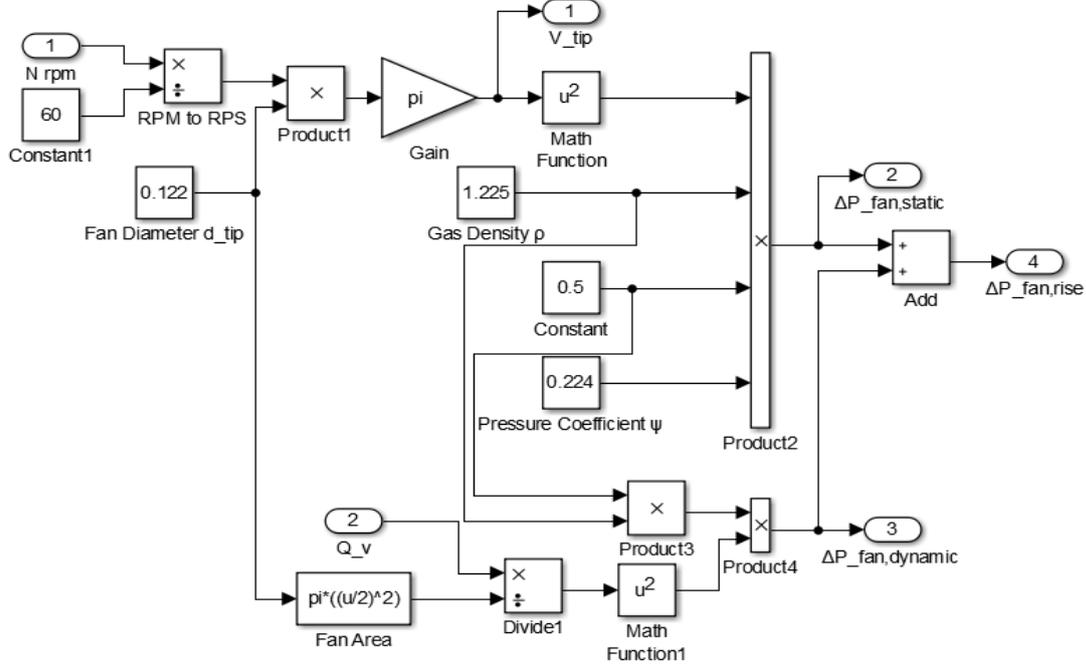
ويصبح المخطط الموافق لتأثير شفرات المروحة والذي يُنتج فرق الضغط $\Delta P_{fan,rise}$ كما في الشكل (10.3).

6. أثر القناة على عملية التحكم بتدفق الهواء:

باعتبار الغازات (الهواء) التي سيتم التحكم بتدفقها عبر القناة لن تتعرض لأي انضغاط [19]، سيتم دراسة أثر القناة على أنه ضياع في الضغط عبر مختلف أجزاء القناة $\Delta P_{loss,duct}$ ، وسنناقش فقط الضياعات الناتجة عن احتكاك الغازات مع جدران القناة والضياعات الناتجة عن تغير مقطع القناة، وسيتم إهمال تغير قيمة الضغط الناتجة عن تغير الارتفاع على اعتبار أن ارتفاع جميع أجزاء القناة المستخدمة عن سطح البحر ثابت، مع العلم أن تغير الضغط الناتج عن تغير الارتفاع يمكن حسابه من خلال معادلة برنولي التي سنستخدمها لحساب تدفق الهواء، وباعتبار أن الهواء لا يتجمع في أي نقطة من القناة الموضحة في الشكل (3.3) ولا يتعرض لأي انضغاط، نستطيع القول أن مبدأ الاستمرارية الموضح في المعادلة التالية [20] محقق:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (15.3)$$

أي أن سرعة الهواء تزداد عندما تنقص مساحة المقطع الذي يتدفق الهواء عبره، وكمية الهواء الداخلة عبر مدخل القناة خلال الفترة الزمنية Δt تساوي كمية الهواء الخارجة عبر مخرج القناة خلال الفترة الزمنية Δt ، مع العلم أن A_i هي مساحة المقطع



الشكل (10.3): المخطط الصندوقي لتأثير شفرات المروحة المستخدمة $\Delta P_{fan,rise}$.

رقم i وواحدتها $[m^2]$ ، و v_i سرعة حركة الهواء عبر المقطع i وواحدتها $[m/sec]$. سنقوم باستخدام معادلة برنولي لحساب سرعة الهواء عبر مقطع معين من القناة، ويمكن وصف معادلة برنولي بأنها تطبيق مباشر لمبدأ انحفاظ الطاقة للغازات والسوائل، وتنص على أن مجموع الضغط والطاقة الحركية لوحدة الحجم والطاقة الكامنة الثقالية لوحدة الحجم في نقطة من خط جريان غاز (أو سائل) تساوي مقداراً ثابتاً ولا يتغير عند أية نقطة أخرى من هذا الخط، ويمكن صياغة هذا النص رياضياً كما يلي [4]:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 = \text{constant} \quad (163)$$

حيث z_i هو الارتفاع عن سطح البحر عند المقطع i وواحدته $[m]$ ، g تسارع الجاذبية الأرضية وواحدته $[m/sec^2]$ ، و P_i قيمة ضغط الغاز على المقطع i وواحدته $[Pa]$ ، و ρ الكتلة الحجمية للغاز المستخدم وواحدتها $[kg/m^3]$.

باعتبار $z_1 = z_2$ ، وتعويض $v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2}$ من المعادلة (15.3) في المعادلة (16.3) نحصل على مايلي:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2}} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 1}}; \Delta P = P_1 - P_2 \quad (173)$$

حيث D_i قطر المقطع i وواحدته $[m]$.

والآن يمكن حساب قيمة التدفق الحجمي للهواء Q_v عبر القناة المستخدمة من خلال المعادلة التالية [20]:

$$Q_{vi} = A_i v_i \quad (183)$$

حيث Q_{vi} التدفق الحجمي للهواء عبر المقطع i ويقدر بالوحدة $[m^3/sec]$ ، ومن مبدأ الاستمرارية (الموضح في المعادلة (153)) يمكن القول إن التدفق الحجمي للهواء يكون متساوياً لجميع مقاطع القناة المستخدمة. ملاحظة 1: يمكن تطبيق معادلة برنولي طالما أن سرعة حركة الغاز أو السائل أصغر من 0.3mach . ملاحظة 2: يمكن استخدام المعادلة (18.3) عند دراسة تدفق غازات وسوائل غير لزجة، أما بالنسبة للسوائل اللزجة يحدث

تحول لقسم من الطاقة الحركية للسائل إلى طاقة حرارية نتيجةً لاحتكاك الطبقات الداخلية للسائل مع بعضها البعض واحتكاك السائل مع الأسطح المختلفة للمجرى، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض سرعة حركة السوائل، لذلك يتم استخدام معامل (C) Discharge Coefficient لأجل كل سائل من السوائل اللزجة، لتصبح المعادلة (18.3) كما يلي:

$$Q_{vi} = CA_i v_i \quad (193)$$

حيث أن الثابت C مرتبط بعدد رينولدز (Re) Reynolds، وحسابه ليس موضوع البحث نظراً لكوننا ندرس تدفق الغازات (الهواء بالتحديد) عديمة اللزوجة وبالتالي $C=1$.

ملاحظة 3: عند الحاجة لحساب التدفق الكتلي Q_m ، يمكن الحصول هذه القيمة من خلال المعادلة التالية:

$$Q_m = \rho Q_v \quad (203)$$

حيث وحدة التدفق الكتلي Q_m هي $[kg/sec]$.

نجد من المعادلة (173) أن حساب تغير الضغط مطلوب لحساب سرعة حركة الهواء وبالتالي التدفق الحجمي للهواء عبر القناة المستخدمة، ومن ثم يمكن صياغة معادلة تغير الضغط كما في المعادلتين (23) و(1.3). بالنسبة لصياح الضغط الناتج عن الاحتكاك مع أجزاء القناة يمكن وصفه كما يلي [21]:

$$\Delta P_{\text{loss,friction resistance}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{L_i}{D_i} \rho \frac{Q_{vi}^2}{2A_i^2} \quad (213)$$

حيث $n=3$ أي أن القناة المستخدمة تتألف من ثلاثة مقاطع (الشكل (3.3))، L_i طول المقطع رقم i ويقدر بالوحدة $[m]$ ، أما λ_i فهو معامل الاحتكاك للمقطع i ويُحسب (لكل مقطع) لأجل عمليات التدفق الصفائحي Laminar Flow ($Re \leq 2300$) من المعادلة التالية [21]:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (223)$$

ويتم حساب قيمة Re من المعادلة التالية [21]:

$$Re = \frac{\rho D Q_v}{A \mu} \quad (233)$$

وبتعويض المعادلة (233) في (22.3) نحصل على ما يلي:

$$\lambda = \frac{16\pi\mu D}{\rho Q_v} \quad (243)$$

حيث μ معامل اللزوجة (المطلق) الديناميكي (Dynamic (absolute) viscosity coefficient)، ووحدته $[kg/m\text{-sec}]$ ويأخذ القيمة $\mu = 1.812 \times 10^{-5} \text{kg/m}\text{-sec}$ [22] لأجل الهواء عند درجة حرارة $T=15^\circ\text{C}$ ، ويحسب من المعادلة التالية من صيغة Sutherland [22]:

$$\mu = \mu_o * (a/b) * (T/T_o)^{3/2} \quad (a243)$$

$$a = 0.555T_o + S \quad (b.24.3)$$

$$b = 0.555T + S \quad (c.24.3)$$

حيث μ قيمة معامل لزوجة الغاز (وواحدتها centipoise ضمن صيغة Sutherland) عند درجة حرارة T (وواحدتها Rankine)، μ_o قيمة معامل لزوجة الغاز المرجعية (وواحدتها centipoise ضمن صيغة Sutherland) عند درجة حرارة مرجعية T_o (وواحدتها Rankine)، و S ثابت Sutherland، ونجد القيمة $S=120$ من [22]، و $\mu_o=0.01827cp$ و $T_o=524.07^\circ R$ لأجل الهواء [23]، مع العلم أن العلاقة التي تربط الوحدة Celsius بالوحدة Rankine والعلاقة التي تربط الوحدة Centipoise (cp) بالوحدة kg/m-sec تعطيان كما يلي [22]:

$$\text{Rankine}=(\text{Celsius}\times\frac{9}{5})+491.67 \quad (a.25.3)$$

$$\text{Celsius}=(\text{Rankine}-491.67)\times\frac{5}{9} \quad (b.25.3)$$

$$0.001*\eta[\text{cp}]=\eta[\text{kg/m-sec}] \quad (26.3)$$

من المهم التذكير أن المعادلة (24.3) صالحة لأجل الأبخرة الهيدروكربونية والغازات الطبيعية ضمن مجال درجة حرارة

$$-17.78^\circ C \leq T \leq 537.78^\circ C, \text{ أما للغازات الأخرى فيجب أن تكون درجة الحرارة } -273^\circ C \leq T \text{ [22].}$$

وعند الحاجة لقياس ضياع الضغط الناتج عن الاحتكاك لأجل عمليات تدفق من الشكل Turbulent Flow عندما يكون $Re \geq 3500$ يتم حساب معامل الاحتكاك λ وفق المعادلة التالية [21]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\log\left[\frac{e}{3.72D} + \frac{2.54}{Re^{0.091}}\right] \quad (27.3)$$

ونلاحظ من المعادلة (27.3) أن معامل الاحتكاك λ يرتبط بقيمة Re والنسبة $\frac{e}{D}$ حيث e معدل ثخانة جدار القناة ويقدر بالوحدة [m] و D قطر المقطع الذي نقيس التدفق ضمنه ويقدر بالوحدة [m].

وعند الحاجة لقياس ضياع الضغط الناتج عن الاحتكاك لعمليات تدفق يكون فيها $2300 \leq Re \leq 3500$ يتم حساب معامل الاحتكاك λ من المعادلة التالية [21]:

$$\lambda = \frac{\lambda_{2300}(3500-Re) + \lambda_{3500}(Re-2300)}{3500-2300} \quad (28.3)$$

حيث λ_{2300} قيمة معامل الاحتكاك λ المحسوبة عند $Re=2300$ ، و λ_{3500} قيمة معامل الاحتكاك λ المحسوبة عند $Re=3500$.

إن قيمة Re المستخدمة في هذا البحث هي $Re \leq 2300$ ، لذلك سنستخدم المعادلة (28.3) لحساب معامل الاحتكاك λ ، وبتعويض قيمة λ ضمن المعادلة (21.3) لحساب قيمة ضياع الضغط $\Delta P_{\text{loss,friction resistance}}$ وترتيب العلاقة الناتجة نحصل على المعادلة التالية:

$$\Delta P_{\text{loss,friction resistance}} = \frac{128 \mu Q v}{\pi} \left[\frac{L_1}{D_1^4} + \frac{L_2}{D_2^4} + \frac{L_3}{D_3^4} \right] \quad (29.3)$$

وبتعويض الأبعاد من الشكل (11.3) (المرسوم باستخدام برنامج SketchUp 2017) ضمن المعادلة (29.3) نحصل على المعادلة المُستخدمة لبناء نموذج Simulink الموافق لضياع الضغط $\Delta P_{\text{loss,friction resistance}}$ الموضح في الشكل (12.3)، ولحساب ضياع الضغط الناتج عن تغيير مقطع القناة $\Delta P_{\text{loss,local resistance}}$ تُستخدم المعادلة التالية [4]، وهي تعبر عن ضياع الضغط الناتج عن انتقال الهواء من المقطع i إلى المقطع i+1:

$$\Delta P_{\text{loss,local resistance } i \rightarrow i+1} = \xi \frac{\rho}{2} \left[\frac{Q_{vi}}{A_i} \right]^2 \quad (303)$$

حيث ξ هو معامل المقاومة المحلية Coefficient of local resistance، ويحسب من المعادلة التالية [24]:

$$\xi_{i \rightarrow i+1} = \left[1 - \frac{A_i}{A_{i+1}} \right]^2 \quad (313)$$

ليكون ضياع الضغط الكلي $\Delta P_{\text{loss,local resistance}}$ كما في المعادلة التالية:

$$\Delta P_{\text{loss,local resistance}} = \sum_{i=1}^{n-1} \xi_{i \rightarrow i+1} \frac{\rho}{2} \left[\frac{Q_{vi}}{A_i} \right]^2 \quad (323)$$

وبتعويض المعادلة (31.3) في المعادلة (30.3) لجميع مقاطع القناة ثم تعويض النتائج في المعادلة (32.3)

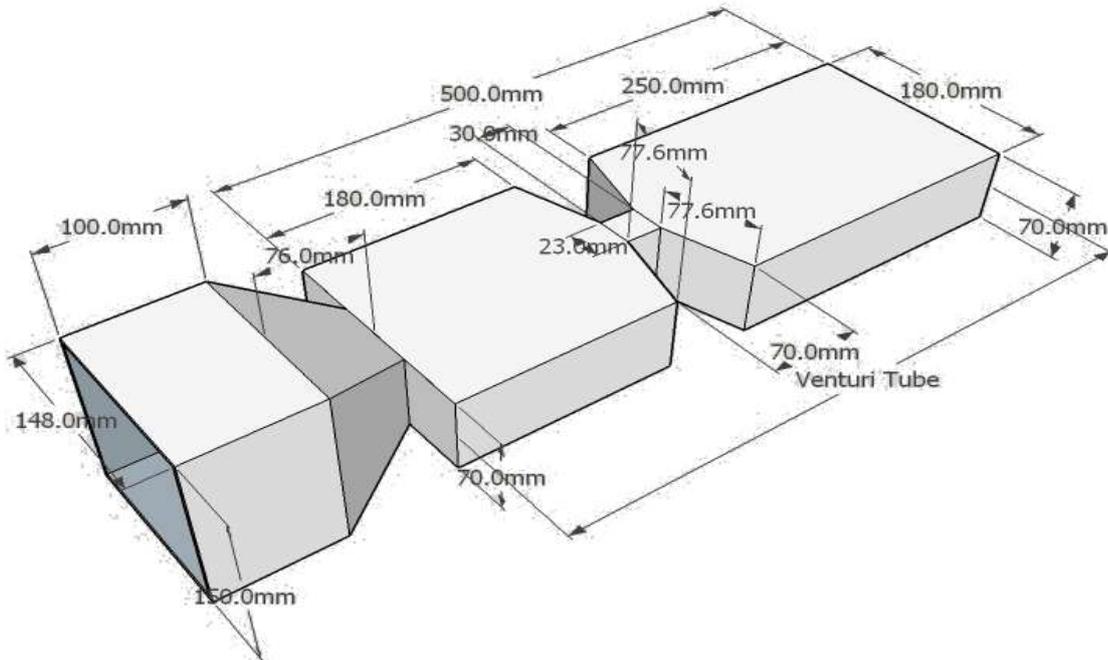
نحصل على

المعادلة التالية:

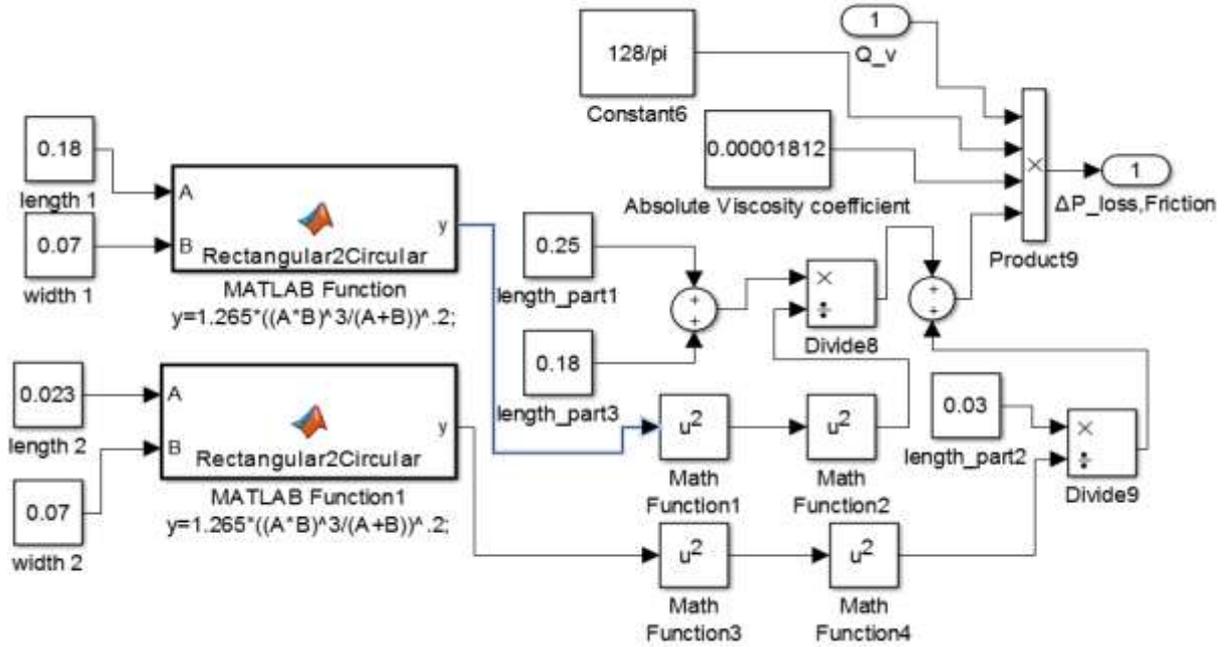
$$\Delta P_{\text{loss,local resistance}} = \frac{8\rho}{\pi^2} Q_v^2 \left[\left[\frac{1-A_1}{D_1} \right]^2 + \left[\frac{1-A_2}{D_2} \right]^2 \right] \quad (333)$$

وهي المعادلة التي سنستخدمها لبناء نموذج Simulink الموافق لضياح الضغط $\Delta P_{\text{loss,local resistance}}$ الموضح

في الشكل (13.3).



الشكل (11.3): مخطط تفصيلي لأنبوب فينتوري الموجود في اللوحة التدريبية المستخدمة.



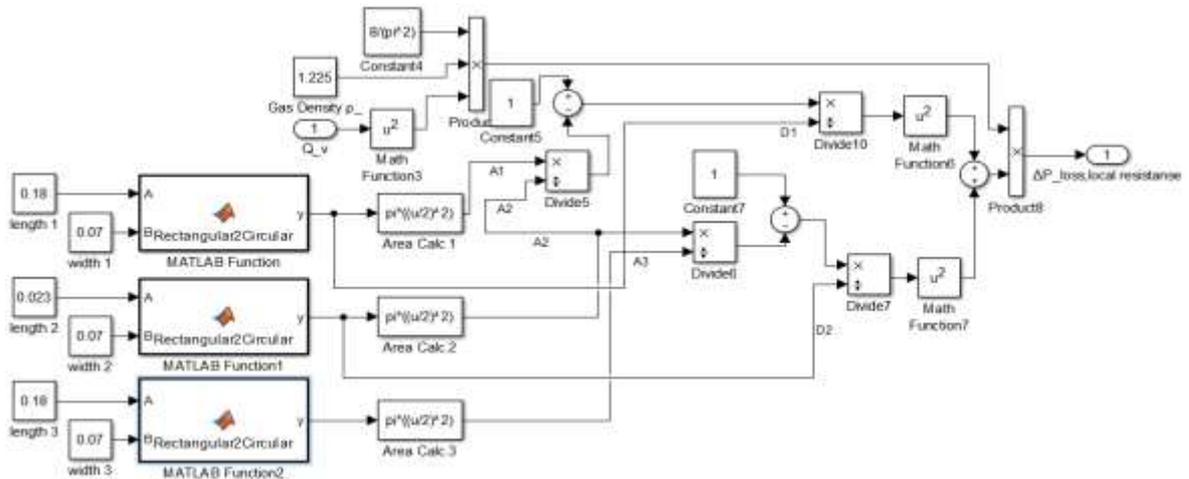
الشكل (12.3): نموذج Simulink الموافق لضياح الضغط الناتج عن الاحتكاك مع جدران القناة المستخدمة $\Delta P_{loss,friction}$.

نلاحظ من الشكل (11.3) أن القناة المستخدمة في هذا البحث ذات مقطع مستطيل أي غير دائري، لذلك يجب علينا إيجاد قطر المقطع الدائري الموافق لكل مقطع مستطيل، وهذا ما نحصل عليه باستخدام المعادلة التالية [25]:

$$D = 1.265 \sqrt[5]{\frac{(le \cdot w)^3}{le + w}} \quad (34.3)$$

حيث le طول المقطع المستطيل لجريان الهواء وواحدته [m]، و w عرض المقطع المستطيل وواحدته [m]، والشكلين (12.3) و(13.3) يحتويان المعادلة (34.3).

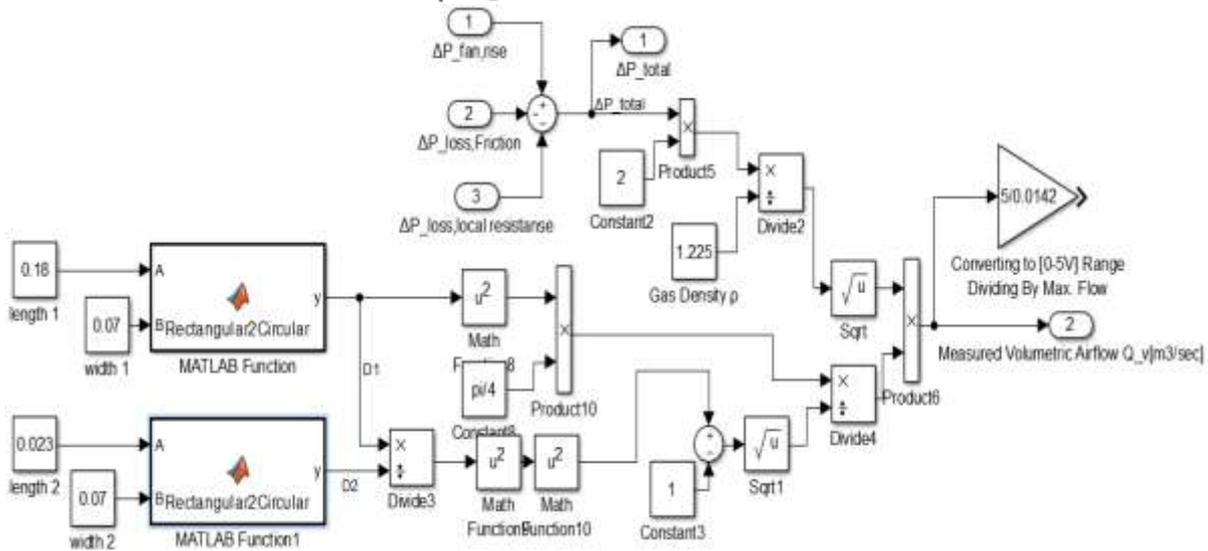
والآن نستطيع حساب جميع أجزاء المعادلة (2.3) وبالتالي ΔP_{total} ، وبتعويض هذه القيمة وقيمة سرعة الهواء من المعادلة (17.1) في المعادلة (18.1)، نحصل على العلاقة النهائية التي تربط تدفق الهواء مع فرق الضغط الكلي عبر القناة،



الشكل (13.3): نموذج Simulink الموافق لضياح الضغط الناتج عن تغيرات مقطع القناة $\Delta P_{loss,local resistance}$.

مع العلم أننا اخترنا تدفق الهواء من المقطع 1 إلى المقطع 2، وهي الموضحة في الشكل (14.3):

$$Q_{v1} = v_1 A_1 = \sqrt{\frac{2\Delta P_{total}}{\rho}} \frac{\pi}{4} \frac{D_1^2}{\sqrt{\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 - 1}} \quad (35.3)$$



الشكل (14.3): نموذج Simulink الموافق لقيمة تدفق الهواء عبر القناة المستخدمة.

7. وصف الحجرة التي سيتم التحكم بدرجة حرارة الهواء ضمنها:

تحتوي الحجرة الموجودة ضمن اللوحة Lab Volt 3522 على سخان يُطبَّق عليه أمر تحكم، وهذا الأمر عبارة عن قيمة جهد تتراوح ضمن المجال 0v-5v، ليقوم برفع درجة حرارة الهواء ضمن حجم V (بوافق حجم الحجرة)، ويمكن وصف سلوك هذه العملية باستخدام قانون توازن الطاقة الحرارية، حيث يمكن التعبير عن كمية الحرارة q_a المجمّعة ضمن حجم V ثابت (الحجم يحوي السخان) وفق المعادلة التالية [5]:

$$q_a = q + q_i - q_o - q_t \quad (36.3)$$

حيث q كمية الحرارة التي يعطيها السخان وواحدتها [J/sec] أو [W]، q_i كمية الحرارة التي يقدمها الهواء الداخل إلى الحجم V (ضمن القناة)، q_o كمية الحرارة التي تخرج مع الهواء الخارج من الحجم V، q_t كمية الحرارة التي يفقدها الحجم V إلى الوسط المحيط نتيجة الإشعاع Radiation والناقلية الحرارية Conduction.

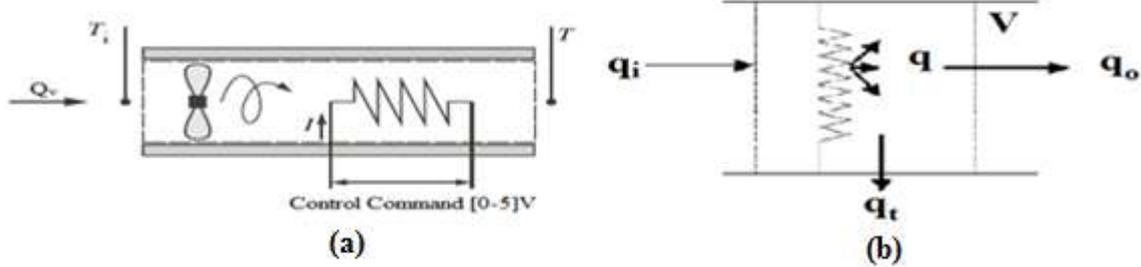
8. نمذجة عملية التحكم بدرجة حرارة الهواء المدروسة:

يظهر في الشكل (15.3) [5] توضيح لحركة الهواء وكمية الحرارة ضمن الحجرة ذات الحجم V، حيث يؤدي تجمع الحرارة ضمن الحجم V إلى ارتفاع درجة حرارة الهواء ضمنه، وباعتبار درجة الحرارة ضمن كامل الحجم V متساوية، يمكن تقريب الوصف الرياضي لكمية الحرارة المجمّعة ضمن الحجم V إلى الشكل الموضح في المعادلة التالية [5]:

$$q_a = mC_p \frac{dT}{dt} \quad (37.3)$$

حيث m كتلة الهواء الموجود ضمن الحجم V ووحدتها $[kg]$ ، و T درجة حرارة الهواء ضمن الحجم V ووحدتها $[^{\circ}C]$ ، و C_p السعة الحرارية Heat Capacity للهواء الذي يشغل الحجم V وتساوي عند درجة حرارة $T=15^{\circ}C$ وضغط جوي عند سطح البحر $C_p=1.0066258375kJ/kgC$ ، وتحسب من المعادلة التالية [15]:

$$c_p = 1002.5 + 275 \times 10^{-6} (T_K - 200)^2 \text{ [J/kgK]} \quad (383)$$



الشكل (15.3): (a) توضيح حركة الهواء ضمن الحجم V .

(b) توضيح حركة الحرارة ضمن الحجم V .

وتُقَدَّر كمية الحرارة التي تأتي مع الهواء المتدفق إلى الحجم V وكمية الحرارة التي تخرج مع الهواء المتدفق خارج الحجم V من خلال المعادلات التالية:

$$q_i = C_p \rho Q_v T_i = C_p Q_m T_i \quad (a.39.3)$$

$$q_o = C_p \rho Q_v T = C_p Q_m T \quad (b.39.3)$$

حيث T_i درجة حرارة الهواء الداخل إلى الحجم V (درجة حرارة الغرفة) ووحدتها $[^{\circ}C]$ ، و T درجة حرارة الهواء ضمن الحجم V ووحدتها $[^{\circ}C]$ (وهي درجة حرارة الهواء الخارج من الحجم V). إن طرفي القناة مفتوحين، وبالتالي يكون الهواء داخل الحجم V ملائماً للهواء في الوسط المحيط، لذلك يمكن إهمال المقدار q_t [5]، لتصبح المعادلة (36.3) كما يلي:

$$q_a = q + q_i - q_o \quad (40.3)$$

وبتعويض المعادلتين (37.3) و(39.3) في المعادلة (40.3) نحصل على ما يلي:

$$\frac{m}{\rho Q_v} \frac{dT}{dt} = T_i - T + \frac{1}{\rho C_p Q_v} q \quad (41.3)$$

نلاحظ وجود دخلين للنظام هما T_i و q ، ولذلك سنضطر لاستخدام طريقة Superposition لإيجاد تابعي نقل للعملية المدروسة، لكن يجب علينا قبل استخدام هذه الطريقة أن نتأكد من إمكانية استخدامها، ولذلك سنستخدم Deviation Variables حول حالة الاستقرار Steady State، ويتم تعريف هذه الحالة كما يلي:

$$\frac{m}{\rho Q_v} \frac{dT}{dt} = T_i - T + \frac{1}{\rho C_p Q_v} q = 0 \quad (42.3)$$

وعند حالة الاستقرار يكون $\frac{dT}{dt} = 0$ وبالتالي تكون معادلة حالة الاستقرار كالتالي:

$$T_s = T_{i,s} + \frac{1}{\rho C_p Q_v} q_s \quad (43.3)$$

وتُعرَّف المتغيرات Deviation Variables (تعبّر هذه المتغيرات عن البعد عن حالة الاستقرار) كما يلي:

$$T' = T - T_s, T'_i = T_i - T_{i,s}, q' = q - q_s$$

وبتعويضها في المعادلة (41.3) نحصل على ما يلي:

$$\frac{m}{\rho Q_v} \frac{d(T' + T_s)}{dt} = T'_i + T_{i,s} - T' - T_s + \frac{1}{\rho C_p Q_v} (q' + q_s) \quad (44.3)$$

وبتعويض قيمة T_s من المعادلة (43.3) في المعادلة (44.3) نحصل على التالي:

$$\frac{m}{\rho Q_v} \frac{dT'}{dt} = T'_i - T' + \frac{1}{\rho C_p Q_v} q' \quad (45.3)$$

نجد أن المعادلة (45.3) مشابهة للمعادلة (41.3) بدون استخدام Deviation Variables لأن المعادلة (41.3) خطية، وبالتالي يمكن استخدام طريقة Superposition، وبإجراء تحويل لابلاس للمعادلة (41.3) نجد:

$$\frac{m}{\rho Q_v} (sT(S) - T(0)) = T_i(S) - T(S) + \frac{1}{\rho C_p Q_v} q(S) \quad (46.3)$$

(1) عندما $T_i(S)=0$ مع افتراض $T(0)=T_i(S)$ نجد:

$$\frac{T(S)}{q(S)} = \frac{1}{\rho C_p Q_v} \frac{m}{\rho Q_v} \frac{1}{s + 1} \quad (47.3)$$

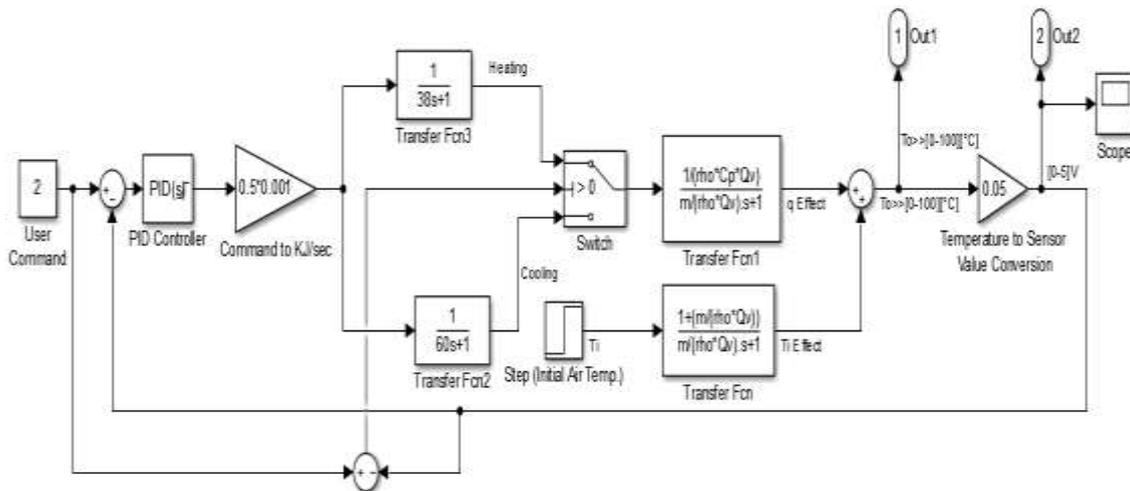
(2) عندما $q(S)=0$ مع افتراض $T(0)=T_i(S)$ نجد:

$$\frac{T(S)}{T_i(S)} = \frac{1 + \frac{m}{\rho Q_v}}{\frac{m}{\rho Q_v} s + 1} \quad (48.3)$$

إذا علمنا أن الاستطاعة التي تعطيها اللوحة التردبية Lab Volt 3522 تساوي 2.5W، وأن هذه الاستطاعة توافق أمر تحكم قيمته 5V، يمكن القول إن كمية الحرارة التي يعطيها سخان الموجود في اللوحة يرتبط مع أمر التحكم (وواحدته [V]) وفق ما يلي:

$$q(t) = 0.5 * 0.001 V_i \text{ [kJ/sec]} \quad (49.3)$$

يوضح الشكل (16.3) المخطط الصندوقي لعملية التحكم بدرجة الحرارة الموصوفة بالمعادلتين (47.3) و(48.3)، مع ملاحظة أن الحساس المستخدم في اللوحة يعاير ليعطي قراءة ضمن المجال [0-5]V لأجل درجات حرارة [0-100]°C.



الشكل (16.3): المخطط الصندوقي المستخدم لنمذجة حجرة ذات حجم V ويتم التحكم بدرجة حرارة الهواء ضمنها.

نلاحظ أن المعادلتين (47.3) و(48.3) عبارة عن تابعي نقل بالصيغة القياسية لنظام من الدرجة الأولى أي أن

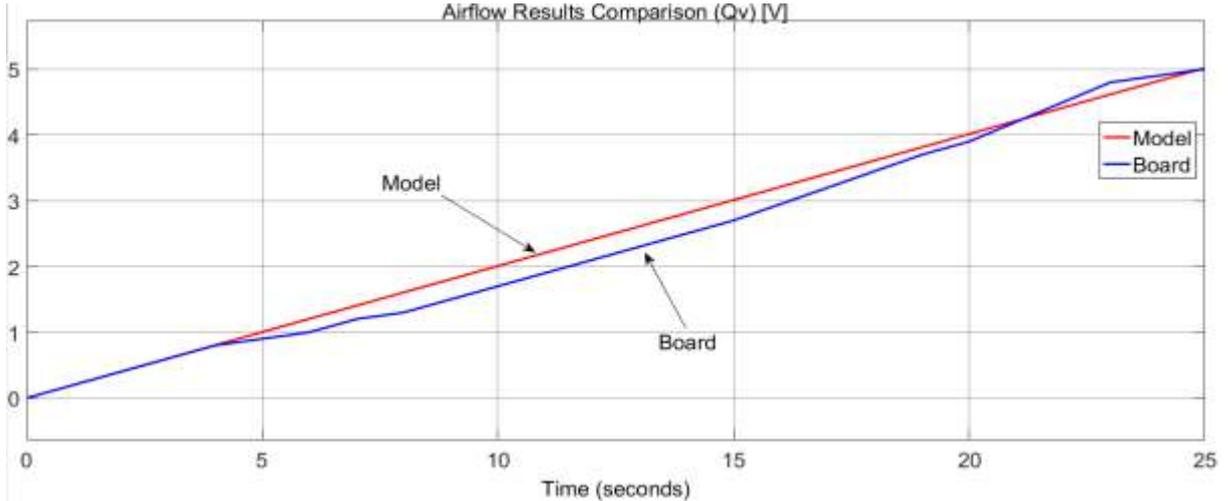
أمثال S

في المقام توافق الثابت الزمني لعملية التحكم بدرجة الحرارة للهواء المتدفق عبر الحجم V (القناة)، إلا أن قيمة هذا الثابت تكون موافقة للفترة التي تلي انتشار أثر أمر التحكم (الموافق للاستطاعة التي يعطيها السخان) إلى كامل الحجم V الذي يتأثر بعملية التسخين (وهذا الحجم يوافق الحجم الواقع بين السخان والحساس)، ويمكن الحصول على قيمة هذا الثابت الزمني τ من النشرة الفنية للوحة المستخدمة [7] حيث $\tau_1=38\text{sec}$ لأجل التسخين و $\tau_2=60\text{sec}$ لأجل التبريد، لذلك سنقوم بإضافة عملية اختيار أحد صندوقين يوافق الأول تحقيق الثابت الزمني لانتشار أثر التحكم لعملية التسخين والثاني لعملية التبريد، ويتم اختيار الصندوق الموافق للتسخين عندما تكون درجة الحرارة الحالية للهواء T ضمن الحجم V أصغر من درجة الحرارة المطلوبة، ويتم اختيار الصندوق الموافق للتبريد عندما تكون درجة الحرارة للهواء T ضمن الحجم V أعلى من درجة الحرارة المطلوبة، أما بالنسبة لدرجة الحرارة المطلوبة، يتم تحديدها على مدخل المتحكم PID المستخدم لضبط درجة حرارة الهواء ضمن الحجم V.

النتائج والمناقشة:

1. استخدام نموذج القناة المصممة في هذا البحث للتحكم بتدفق الهواء:

عند تطبيق أمر تحكم يتغير من القيمة 0V حتى 5V (على دخل النظام الموضح بالشكل (2.3)) بدون استخدام صندوق الثابت الزمني 1.3sec نحصل على الاستجابة الموضحة في الشكل (14) ونلاحظ أنها استجابة متوافقة مع سرعة دوران المحرك (المروحة)، كما تم مقارنتها مع الاستجابة الحقيقية في اللوحة Lab Volt 3522، ويظهر في هذا الشكل أن تدفق الهواء عبر أنبوب فينتوري لا يتغير بشكل خطي تماماً مع تغير سرعة دوران المحرك (المروحة)، وهذا يعود لوجود عوامل تؤثر على حركة الهواء أبرزها تصادم جزيئات الهواء مع بعضها أثناء انتقالها عبر مناطق التضيق والتوسع بين المقاطع المختلفة لأنبوب فينتوري.



الشكل (14): مقارنة تغير تدفق الهواء (عند تطبيق أمر تحكم يتغير من 0V حتى 5V) بين النموذج الرياضي المستخدم والنموذج الحقيقي (النموذج الرياضي يعطي خرجاً خطياً متناسباً مع الدخل).

من الشكل (14) يمكن القول إن نموذج عملية التحكم بتدفق الهواء المنفذ بالاعتماد على النمذجة الرياضية أعطى نتائج (خطية) قريبة من الواقع قبل تنفيذ النموذج بشكل عملي، وهنا يكمن الجوهر الأساسي لعملية النمذجة. ملاحظة: يمكن استخدام نموذج القناة المصممة في هذا البحث كجزء من نمذجة نظام تكييف HVAC مع مراعاة إمكانية استخدام محركات تعمل بالتيار المتناوب، والتي تعطى سرعة دورانها بالمعادلة التالية [4]:

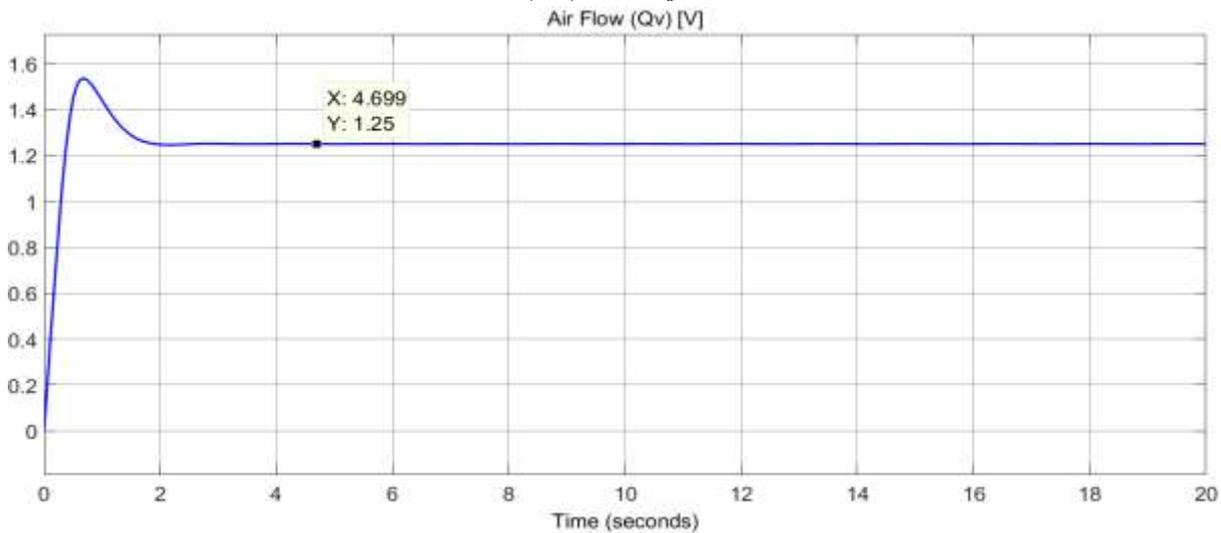
$$N=120\frac{f}{p} \text{ [rpm]} \quad (14)$$

حيث f تردد إشارة التغذية الكهربائية و p عدد أقطاب المحرك المستخدم.

2. معايرة وأداء المتحكم PID لضبط قيمة تدفق الهواء عبر القناة:

عند إجراء عملية معايرة بارامترات المتحكم PID (المستخدم لضبط قيمة تدفق الهواء) باستخدام طريقة Ziegler-Nichols

نحصل على القيم $K_u=8$, $T_u=1\text{sec}$, $K_p=4.8$, $K_I=9.6$, $K_D=0.6$ مع التنبيه لعدم الحاجة لاستخدام المرشح لأن الإشارة المدروسة لا تتغير بسرعة كبيرة، وكمثال على أداء هذا المتحكم، سنقوم باستخدامه للحصول على تدفق هواء Q_v ذو قيمة 25% (يوافق أمر تحكم قيمة 1.25V) من التدفق الأعظمي المتاح تنفيذه باستخدام هذه اللوحة التدريبية، وسنحصل على الاستجابة الموضحة في الشكل (2.4).



الشكل (2.4): الاستجابة التي يتم الحصول عليها عند استخدام المتحكم المنفذ للحصول على تدفق $Q_v=25\%$ من التدفق الأعظمي الذي تؤمنه اللوحة التدريبية المستخدمة.

3. استخدام نموذج الحجرة المصممة في هذا البحث للتحكم بدرجة حرارة الهواء ضمنها:

عند استخدام نموذج الحجرة المنفذ في هذا البحث للتحكم بدرجة حرارة الهواء ضمنها يجب مراعاة ثلاث نقاط

أساسية:

- 1) إن طرفي القناة التي تحوي السخان مفتوحان، وبالتالي يمكن إهمال تبادل الحرارة بين الحجم V الذي نسجن الهواء ضمنه والوسط المحيط عبر جدران القناة.
- 2) عند عدم وجود أمر تسخين، ستكون درجة حرارة الهواء ضمن القناة مساوية تقريباً لدرجة حرارة الهواء في الوسط المحيط.

(3) عندما تكون المروحة متوقفة، يمكن إهمال قيمة تدفق الهواء Q_v الناتجة عن وجود فرق بالضغط بين القناة والوسط المحيط، لكن عندما يتم تطبيق أمر تسخين سيبدأ الهواء الموجود ضمن الحجم V بالتمدد ومن ثم سيبدأ بالتحرك، وبالتالي يجب مراعاة الحالتين التاليتين لقيمة تدفق الهواء عند توقف المروحة:

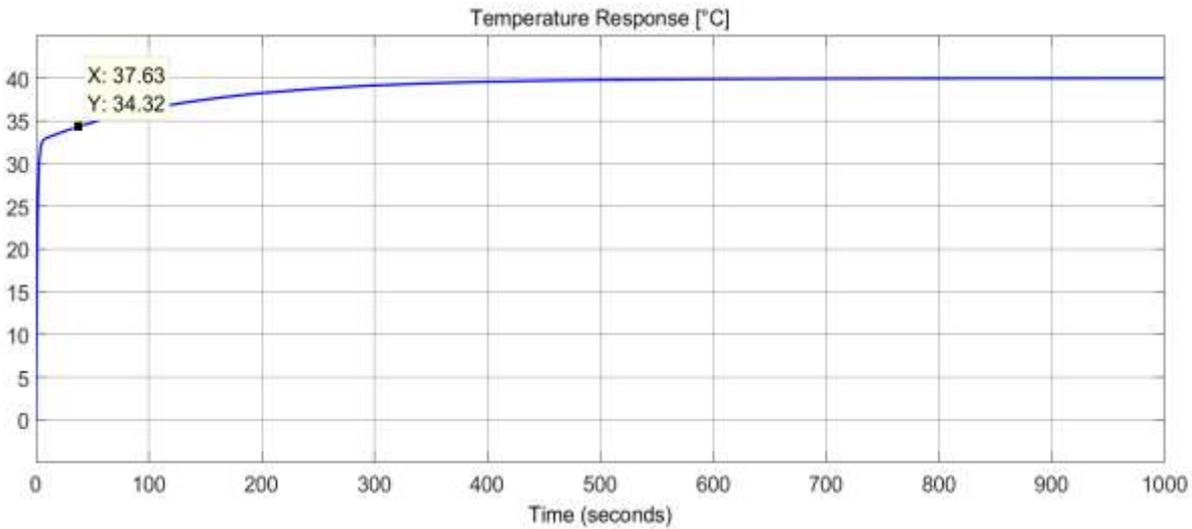
الحالة الأولى: عند عدم وجود أمر تسخين، تكون قيمة تدفق الهواء $Q_v \approx 0$ [m³/sec].

الحالة الثانية: عند وجود أمر تسخين أعظمي (5V)، تكون قيمة تدفق الهواء $Q_v = 0.000042$ [m³/sec] مما يمنع ارتفاع درجة حرارة الهواء ضمن الحجم V فوق القيمة 80°C المحددة ضمن النشرة الفنية للوحة التدريرية التي نعمل على بناء نموذج رياضي مكافئ لها، مع العلم أنه تم حساب قيمة تدفق الهواء في الحالة الثانية بالاعتماد على النموذج الرياضي المنفذ في هذه الدراسة والتأكد من توافقها مع القيمة المعطاة في النشرة الفنية للوحة التدريرية، وأن ضبط قيمة تدفق الهواء على القيمة $Q_v = 0$ [m³/sec] يقابل زيادة درجة حرارة الهواء ضمن الحجم V إلى قيمة لا نهائية مع مرور الزمن، ذلك لأن كمية الحرارة المقدّمة من السخان ستتجمّع بشكل مستمر ضمن الحجم V الذي لا يخرج منه الهواء ولا يدخل إليه، بالإضافة لكون التبادل الحراري مع الوسط المحيط مهمل.

(4) معايرة وأداء المتحكم PID لضبط قيمة درجة حرارة الهواء ضمن الحجرة:

عند إجراء عملية معايرة بارامترات المتحكم PID (المستخدم لضبط درجة حرارة الهواء ضمن الحجم V) باستخدام طريقة

Ziegler-Nichols نحصل على القيم $K_u=1$, $T_u=80\text{sec}$, $K_p=0.6$, $K_i=0.015$, $K_D=6$ مع التنبيه لعدم الحاجة لاستخدام المرشح لأن الإشارة المدروسة لا تتغير بسرعة كبيرة، وكمثال على أداء هذا المتحكم، سنقوم باستخدامه للحصول على درجة حرارة 40°C وسنحصل على الاستجابة الموضحة في الشكل (34)، وهذا يوافق أمر تحكم قيمته $u=2V$ (كما في الشكل (16.3))، مع العلم أنه قد تم استخدام القيم $\rho=1.225\text{kg/m}^3$, $T_i=15^\circ\text{C}$ ، $m=\rho*V$, $V=0.03*0.07*0.023=0.0000483\text{m}^3$, $Q_v=0.000042\text{m}^3/\text{sec}$, $C_p=1.0066258375\text{kJ/kgC}$ في النموذج المُستخدم.



الشكل (3.4): الاستجابة التي يتم الحصول عليها عند استخدام المتحكم المنفذ للحصول على درجة حرارة 40°C .

الاستنتاجات والتوصيات:

- (1) إن نموذج القناة المنفّذ في هذا البحث قابل للتعديل ليوافق أي قناة مشابهة مع مراعاة عدد وأبعاد المقاطع المختلفة التي تتكوّن منها القناة المطلوبة.
- (2) يمكن استخدام نموذج التحكم بدرجة الحرارة المنفّذ في هذا البحث لنمذجة نظم التكييف HVAC مع مراعاة وجود تبادل حراري مع الجدران المحيطة بالحجم V في حالة وجود جزء من الهواء يتجمع ضمن حجم V.
- (3) عند استخدام سخان ذو استطاعة تسخين صغيرة (كما في اللوحة التدريبية Lab Volt 3522)، لا توجد فائدة حقيقية من استخدام عمليّتي التحكم بتدفق الهواء ودرجة الحرارة بأن واحد، وذلك لأن أصغر سرعة دوران للمروحة ستمنع ارتفاع درجة حرارة الهواء ضمن الحجم V بقيمة أكبر من 0.001°C .
- (4) عند استخدام استطاعة تسخين كبيرة نسبياً كما في حالة مجفف الشعر أو أنظمة HVAC، يظهر ارتفاع درجة الحرارة بشكل واضح رغم دوران المروحة، وعندها يمكن استخدام متحكم يضبط قيمتي تدفق الهواء ودرجة الحرارة معاً.

المراجع:

- [1] MOHAMAD, M.K., *Developing a thermal model for a residential room using Simulink/Matlab*, SETKÁNÍ KATEDER MECHANIKY TEKUTIN A TERMOMECHANIKY, června, Mikulov, 2012, 26 – 28.
- [2] YAO, J., XU, J., *Indoor Thermal Environment Simulation by using MATLAB and Simulink*, Applied Mechanics and Materials, vol. 29-32, 2010, pp. 2785-2788.
- [3] KUMAR, J., KAPOOR, R., HEMAT, B., *Comparative Analysis of Room Temperature Controller, Using Fuzzy Logic & PID*, Advance in Electronic and Electric Engineering, ISSN 2231-1297, Volume 3, Number 7, 2013, pp. 853-858.
- [4] WU, Z., MELNIK, R. V. N., BORUP, F., *Model-based analysis and simulation of airflow control systems of ventilation units in building environments*, Building and Environment, 42(1), 2007, 203-217.
- [5] *PROCESS TRAINER, LAB # 1, (OPEN LOOP CONTROL), AUTOMATIC CONTROL PROCESS TRAINER*, Alexandria University, 2016.
- [6] MURESAN, V., BALAN, R., NICOLAE, M., RADU, D., *Indoor thermal comfort and energy consumption in a Romanian apartment*, The 6th edition of the Interdisciplinarity in Engineering International Conference “Petru Maior”, University of Tîrgu Mures, Romania, 2012.
- [7] *Lab Volt 3522 Temperature and Flow Control Trainer Datasheet*, TA94056-00 Rev. A, Lab-Volt Systems, Inc. 2000.
- [8] *Lab Volt 3522 Temperature and Flow Control Trainer Instructor Guide*, 32081-10, A, Lab-Volt Systems, Inc. 2000.
- [9] BENNETT, S., *A history of control engineering*, ISBN 978-0-86341-299-8, 1930-1955. IET., 1992, p. p. 48.
- [10] VESELY, V., ROSINOVA, D., *Robust PSD Controller Design*, In Proceedings of the 18th International Conference on Process control, Tatranská Lomnica, Slovakia, 2011, 565–570.
- [11] ANG, K.H., CHONG, G.C.Y., Li, Y., *PID control system analysis, design, and technology*, IEEE Trans Control Systems Tech, 13(4), 2005, pp.559-576.

- [12] CHEN, W. K., *Passive, Active, and Digital Filters, Second Edition (The Circuits and Filters Handbook, 3rd Edition)*, ISBN-13: 978-1420058857, CRC Press, 2009.
- [13] *Comair Rotron GL12B4 Datasheet*, 031074, retrieved on 15/12/2016.
- [14] *UH3D Reference Manual*, Program Version 3.1. Berkeley, CA: ICEM CFD Engineering, 2001.
- [15] DIXON, J. C., *The Shock Absorber Handbook, Second Edition*, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-51020-9, 2007.
- [16] TIPLER, P., A., *Physics for Scientists and Engineers*, Worth Publishers, 3rd ed, 1995.
- [17] LINDEBURG, M. R., *Engineer in Training Reference Manual*, Professional Publication, Inc. 8th Edition, 1992.
- [18] *Natural gas - Calculation of compression factor - Part 2: Calculation using molar-composition analysis*, ISO 12213-2, 2006.
- [19] GOODFELLOW, H., TAHTI, A., *Industrial ventilation design guidebook*, New York: Academic Press, 2000.
- [20] ZALESKI, J. R., *Medical Device Data and Modeling for Clinical Decision Making*, ARTECH HOUSE, ISBN 13: 978-1-60807-094-7, 2011.
- [21] BEJAN, A., *Heat transfer*, New York, Wiley, 1993.
- [22] Crane Company, *Flow of fluids through valves, fittings, and pipe*. Technical Paper No. 410 (TP 410), 1988, (A-5).
- [23] WEAST, R. C., *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 65th edition. Chemical Rubber Company (CRC), CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida. USA, 1984, (F42-44).
- [24] LI, Y., WANG, C., Ha, M., *Experimental Determination of Local Resistance Coefficient of Sudden Expansion Tube*, Energy and Power Engineering, 7, 2015, 154-159.
- [25] الببيكو، عبد الكريم. دليل المهندس الميكانيكي، دار شعاع، 2004.