جمهورية العراق

وزارة التربيـــــــــــــة

المديرية العامة للتعليم المهني

العلوم الصناعية

الصناعي / تكييف الهواء والتثليج

الثاني

تأليف

أ.د. عبد الهادي نعمة خليفة أ.م.د. إحســـان كاظم عباس

أ.م.د. إصبيح وسمي مايد

الطبعة السادسة

2024 م – 1446هـ

استناداً إلى القانون يوزع مجاناً ويمنع بيعه وتداوله

بسم الله الرحمن الرحيم

مقدمة

ألّفت المديرية العامة للتعليم المهني لجنة متخصصة لإعداد كتاب العلوم الصناعية ـ المرحلة الثانية ـ لطلبة التعليم الصناعي ـ تخصص تكييف الهواء والتثليج، وهي مساهمة جزئية ضمن خطة شاملة لتحديث المناهج التعليمية لجميع الاختصاصات المهنية لتواكب النهضة العلمية والتكنولوجية التي يشهدها بل يعيشها العالم اليوم. وهو جزء مكمل للمعلومات النظرية لكتاب العلوم الصناعية المرحلة الأولى.

أُعدَ الكتاب بواقع ثمانية فصول، تناول الفصل الأول منها موائع التثليج الأساسية والثانوية وتأثيرها على طبقة الأوزون والاحترار العالمي (Global Warming) كذلك التعريف بموائع التثليج الانتقالية والحديثة مسندة بمخططات وجداول تلك الموائع. أما الفصل الثاني فقد تناول مفهوم خزان التذرير واستخداماته في منظومات التثليج المختلفة، ومنظومات التثليج متعددة المبخرات وذات مرحلة انضغاط واحدة، ومنظومات متعددة الانضغاط وبمبخر واحد، ومنظومات متعددة الانضغاط والمبخرات، أما الفصل الثالث فخصص لدراسة تأثير الجليد المتراكم على مبخرات منظومات التثليج في أداء المنظومة، وطرق إزالة الجليد من المنظومات. واشتمل الفصل الرابع على حفظ الأغذية باستخدام التثليج. أما الفصل الخامس فتناول أجهزة السيطرة والتحكم على تدفق مائع التثليج الأساسي في المنظومات الانضغاطية. والفصل السادس اشتمل على منظومات التثليج غير الانضغاطية، ومنها الامتصاصية، التثليج بالهواء، الامتزازية، نفث البخار، أنبوب الدوامة، والتثليج الكهروحراري.

أما الفصلين السابع والثامن فقد تم التركيز فيهما على الأجهزة الكهربائية الملحقة بمنظومة التثليج الانضغاطية، فجاء الفصل السابع ليناقش الظاهرة الكهرومغناطيسية والمحولات الكهربائية والتيار المتناوب. واستكملت بالفصل الثامن الذي تضمن المحركات الكهربائية والمرحلات.

لقد تم إدراج أمثلة محلولة في حسابات القوانين والمعادلات الرياضية وغيرها في المواضيع ذات العلاقة. فضلاً عن إعطاء أسئلة مختلفة في نهاية كل فصل ليتمكن الطالب بمساعدة مدرسي المادة من فهم المادة العلمية بشكل أدق وأوسع، واستيعاب مهنة تخصص تكييف الهواء والتثليج بصورة علمية وفنية صحيحة ويكون قادراً على القيام بمهامه الفنية التي سوف يُكّلف بها مستقبلاً من نصب أجهزة تكييف الهواء والتثليج وصيانتها وتحليل العطلات التي سوف تحصل وإيجاد الحلول المنطقية الصحيحة لها.

إن الفصول الدراسية المذكورة آنفاً اعتمدت بشكل أساسي على المفردات العلمية لطلبة المرحلة الثانية، وعلى ما تلقاه الطالب في المرحلة الأولى، لذا فإنها ستكون (بعون الله) القاعدة الأساسية للمراحل الدراسية اللاحقة، وساندة لكتاب التدريب العملي للمراحل الدراسية الثلاث.

نتمنى من الله عز وجل أن نكون قد وفقنا في جهدنا بإعداد هذا الكتاب، وسنكون شاكرين لكل الأخوة المعنيين بهذه المادة إذا ما رفدوا بملاحظاتهم وآرائهم حول الكتاب مع شكرنا واعتزازنا بالجميع.

..... والله الموفق

المؤلفون

بغداد / 2011

	المحتويات	ص
الفصل الأول	**موائع التثليج**	
	مقدمة	6
	خواص موائع التثليج	7
	الخواص الفيزيائية لموائع التثليج	12
	موائع التثليج وطبقة الأوزون	13
	موائع التثليج البديلة	17
	الرطوبة في موائع التثليج	21
	اختيار مائع التثليج	22
	مخططات الضغط المحتوى الحراري	23
	أسئلة الفصل الأول	29
الفصل الثاني	**منظومات التثليج المركبة**	
	مقدمة	31
	إزالة غاز التذرير	32
	التبريد البيني	34
	منظومات متعددة الانضغاط	37
	منظومات متعددة المراحل	38
	منظومات متعددة المبخرات	47
	المنظومات التعاقبية	54
	أسئلة الفصل الثاني	63
الفصل الثالث	**إزالة الجليد في منظومات التثليج**	
	مقدمة	66
	إذابة الجليد باستخدام المسخنات	67
	إذابة الجليد بالغاز الساخن	69
	أسباب تراكم الجليد	72
	أسئلة الفصل الثالث	73
الفصل الرابع	**حفظ الأغذية**	
	مقدمة	75
	الكائنات العضوية الدقيقة	75
	الطرائق القديمة لحفظ الأغذية	77
	الطرائق الحديثة لحفظ الأغذية	78
	السيطرة على نمو الكائنات الدقيقة	80
	تثليج وتجميد الأغذية	84
	أسئلة الفصل الرابع	91

		ص
الفصل الخامس	**السيطرة على موائع التثليج**	
	مقدمة	93
	صمام التمدد الآلي	94
	صمام التمدد الحراري	96
	صمام التمدد الكهربائي	104
	صمام عوامة الضغط الواطئ	105
	صمام عوامة الضغط العالي	106
	الصمام الرباعي	108
	أسئلة الفصل الخامس	112
الفصل السادس	**منظومات التثليج الأخرى**	
	مقدمة	114
	التثليج بالثلج الجاف	114
	التثليج الامتصاصي	116
	التبريد الامتزازي	123
	الثلاجة الامتزازية	124
	التثليج بنفث البخار	128
	دورة الهواء للتثليج	130
	أسئلة الفصل السادس	134
الفصل السابع	**الكهرومغناطيسية والمحولات**	
	مقدمة	136
	التيار الكهربائي	136
	التيار المتناوب أحادي الطور	137
	التيار المتناوب ثلاثي الطور	138
	المغناطيسية الكهربائية	141
	دوائر المحثات	147
	المحولات الكهربائية	151
	التيار المتناوب والعناصر الكهربائية	158
	أسئلة الفصل السابع	162
الفصل الثامن	**المحركات الكهربائية**	
	المحركات الكهربائية ثلاثية الطور	165
	المحركات الحثية	165
	المحركات التزامنية	172
	المحركات الكهربائية أحادية الطور	173
	مرحلات بدء الحركة	179
	حماية المحركات الكهربائية	184
	موصلات التيار ومفاتيح التشغيل	186
	أسئلة الفصل الثامن	188

الفصل الأول

موائع التثليج

Refrigerants

موائع التثليج Refrigerants

1-1 مقدمة Introduction

يطلق على مائع التثليج في منظومات التثليج بالمادة الفعالة أو الشغالة (Working Substance) ويسمى أيضاً مائع التثليج الأساسي (Primary Refrigerant)، ومائع التثليج الأساسي هو وسيط لنقل الحرارة من المبخر (الذي يكون في الحيز المراد تبريده أو تثليجه) إلى المكثف (الذي يكون خارج الحيز المراد تبريده أو تثليجه)، حيث تتم عملية نقل الحرارة عن طريق تبخر مائع التثليج في المبخر عند ضغط واطئ مما يؤدي إلى امتصاص مائع التثليج للحرارة من الحيز المراد تثليجه أو تبريده، بعد ذلك يضغط بخار مائع التثليج المحمل بالحرارة وينقل إلى المكثف، حيث يتم طرح الحرارة إلى المحيط الخارجي وبسبب طرحه للحرارة يتحول جميع بخار مائع التثليج إلى سائل في نهاية المكثف.

وبشكل عام لا يوجد مائع تثليج مثالي يستطيع تغطية جميع تطبيقات التثليج المختلفة، لهذا هنالك أنواع مختلفة من موائع التثليج لكل منها محاسنه ومساوئه ومدى ملائمته لتطبيق معين دون غيره.

بالرجوع للفصل الخامس من كتاب العلوم الصناعية للمرحلة الأولى يلاحظ إن موائع التثليج الأساسية قد قسمت إلى خمس مجموعات رئيسة هي:

- **الهالوكاربونات (Halocarbons)**
- **الهيدروكربونات (Hydrocarbons)**
- **الموائع اللاعضوية (Inorganic Fluids)**
- **الموائع الايزوتروبية (Azeotropic Fluids)**
- **الموائع العضوية غير المشبعة (Unsaturated Organic Fluids)**

وقد وضحت خواص موائع التثليج بشكل عام مع الأسلوب المعتمد من قبل الجمعية الأميركية لمهندسي التدفئة والتثليج وتكييف الهواء (ASHRAE) لترقيم موائع التثليج من أجل التمييز بينها. كما تم التطرق بشكل موجز إلى تأثير موائع التثليج على طبقة الأوزون (Ozone Layer) وظاهرة الاحترار العالمي (Global Warming)، وما هي الموائع الانتقالية والبديلة في الوقت الحالي.

في هذا الفصل سيتم إعطاء تفاصيل أكثر دقة عن موائع التثليج الأساسية المستعملة في منظومات التثليج الانضغاطية (Vapor Compression Refrigeration Systems)، خواصها، استعمالاتها، فضلاً على المعالجات العلمية لتأثير موائع التثليج على طبقة الأوزون وظاهرة الاحترار العالمي التي أدت بدورها إلى ظهور موائع تثليج انتقالية وبديلة.

2-1 خواص موائع التثليج Refrigerant Properties

يمكن إجمال خواص مائع التثليج المراد استخدامه لتطبيق محدد بالخواص الحرارية، الفيزيائية، البيئية والأمان، فضلاً على الجانب الاقتصادي وخواص أخرى لها أهمية تعتمد على نوع التطبيق. وفيما يأتي توضيح لهذه الخواص وتأثيرها:

1-2-1 الخواص الحرارية Thermal Properties

1- ضغط السحب Suction Pressure (P_s)

يفضل أن يكون ضغط بخار مائع التثليج المسحوب من قبل الضاغط (ضغط التشبع) أعلى من الضغط الجوي وذلك لمنع تسرب الهواء الجوي والرطوبة إلى داخل المنظومة، وكذلك لتسهيل اكتشاف تسرب مائع التثليج من المنظومة. كما يفضل ارتفاع ضغط السحب لأن ارتفاعه يؤدي إلى تقليل إزاحة الضاغط وبالنتيجة صغر حجم الضاغط المستخدم بالمنظومة.

2- ضغط التصريف Discharge Pressure (P_c)

يفضل أن يكون ضغط بخار مائع التثليج الخارج من الضاغط بعد عملية الانضغاط (ضغط المكثف) أقل ما يمكن وذلك لتقليل الجهد الميكانيكي على أجزاء منظومة التثليج والتي تشمل الضاغط والمكثف.

3- نسبة الانضغاط Compression Ratio

تعرف نسبة الانضغاط بأنها النسبة بين ضغط التصريف (P_c) إلى ضغط السحب (P_s) وتكتب (P_c/P_s)، وتكون قيمتها أكبر من واحد دائماً، وهذه النسبة يجب أن تكون أصغر ما يمكن للحصول على كفاءة حجميه عالية للضاغط وبالنتيجة التقليل من الطاقة المصروفة للانضغاط في الضاغط.

4- الحرارة الكامنة للتبخر Latent Heat of Vaporization (h_{fg})

تعرف الحرارة الكامنة للتبخر بأنها الحرارة اللازمة لتحويل كيلوغرام واحد من سائل مائع التثليج عند ضغط ودرجة حرارة معينة إلى بخار عند الضغط ودرجة الحرارة نفسيهما. ويفضل أن تكون الحرارة الكامنة للتبخر لموائع التثليج (h_{fg}) أكبر ما يمكن، وذلك لتقليل كتلة مائع التثليج المارة في الدورة.

5- درجة حرارة الانجماد Freezing Temperature

يجب أن تكون لموائع التثليج درجة حرارة انجماد منخفضة، وذلك لتلافي انجماد مائع التثليج داخل منظومة التثليج، أي بعبارة أخرى يجب أن تكون درجة حرارة انجماد مائع التثليج أقل بكثير من أقل درجة حرارة يمكن أن تصلها منظومة التثليج.

6- درجة حرارة الغليان Boiling Temperature

وهي درجة الحرارة التي يتم فيها تحويل سائل مائع التثليج إلى بخار في المبخر، وللحصول على كفاءة جيدة لدورة التثليج، يفضل أن يستخدم مائع تثليج ذو درجة حرارة غليان منخفضة عند الضغط الجوي، إما إذا كانت درجة حرارة الغليان عالية فإنها تتطلب استخدام ضاغط بضغط سحب كبير (ضغط المبخر واطئ جداً قد يكون الضغط أقل من الضغط الجوي) للحصول على درجة الحرارة المنخفضة المطلوبة في المبخر وهذا يقلل من سعة التثليج للمنظومة وكذلك كفاءة التشغيل.

7- درجة الحرارة الحرجة Critical Temperature

تعرف درجة الحرارة الحرجة بأنها درجة الحرارة التي لا يمكن عندها تبديل طور مائع التثليج، أي أنه إذا وجد مائع التثليج بالحالة الغازية عند هذه الدرجة فإنه لا يمكن تحويل مائع التثليج إلى سائل مطلقاً، لذا يجب أن تكون درجة الحرارة الحرجة لمائع التثليج أعلى بكثير من درجة حرارة التكثيف.

يوضح الجدول (1-1) بعض الخواص الحرارية لبعض موائع التثليج شائعة الاستخدام. كما إن هنالك جداول في المراجع العلمية (يمكن الرجوع لها عند الحاجة)، تحتوي على جميع الخواص الحرارية وقيم معامل الأداء للمنظومة الانضغاطية النظرية والقدرة الحصانية لكل طن تثليج عند الظروف القياسية (15°C− درجة حرارة تبخر، 30°C درجة حرارة تكثف).

جدول 1-1 بعض الخواص الحرارية لبعض موائع التثليج

مائع التثليج	الصيغة الكيميائية	درجة حرارة الغليان عند الضغط الجوي °C	درجة حرارة الانجماد °C	الحرارة الكامنة للتبخر kJ/kg
R-12	CCl_2F_2	−29.8	−158	166
R-134a	CF_3CH_2F	−26.2	−103.3	217.2
R-22	$CHClF_2$	−40.8	−160	234.7
R-502	$CHClF_2/CClF_2$-CF_3	−45.4	−160	172.45
R-717	NH_3	−33.33	−77.7	1369.95

2-2-1 الخواص الفيزيائية Physical Properties

1- الحجم النوعي للبخار Vapor Specific Volume

يعرف الحجم النوعي لبخار مائع التثليج بأنه حجم كيلوغرام واحد من مائع التثليج، كلما كبر الحجم النوعي لبخار مائع التثليج ازداد شغل الضاغط لدفع كتله معينة من بخار مائع التثليج، أي أن الحجم النوعي لبخار مائع التثليج يحدد الإزاحة للضاغط، لذا يتطلب أن يكون الحجم النوعي صغيراً من أجل تقليل حجم الضاغط وزيادة كفاءته في منظومة التثليج الانضغاطية.

2- الحرارة النوعية للسائل والبخار Liquid &Vapor Specific Heats

تعرف الحرارة النوعية للمادة بأنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة كيلوغرام واحد من المادة درجة سيليزية واحدة. ويفضل أن تكون الحرارة النوعية لسائل مائع التثليج واطئة وذلك لتقليل كمية غاز التذرير (Flash Gas) عند مدخل المبخر. لأن ضغط السائل ينخفض بعد صمام التمدد ونتيجة لذلك تنخفض درجة حرارته نتيجة تبخر جزء من السائل مكتسباً حرارته الكامنة للتبخر من الجزء المتبقي في حالة السيولة، كما يفضل أن تكون الحرارة النوعية لبخار المائع مرتفعة لأنها تساعد على تقليل تحميص البخار. إن مائع التثليج الذي يمتلك هاتين الخاصيتين يعطي حاصلاً تثليجياً مرتفعاً لوحدة الكتلة منه.

3- معامل التوصيل الحراري Thermal Conductivity

إن معامل التوصيل الحراري لمائع التثليج في طوريه السائل والبخار له أهمية في عملية تصميم أجزاء منظومة التثليج (المكثف والمبخر)، لكونه يدخل في حساب معامل انتقال الحرارة للمكثف والمبخر، حيث يفضل أن يكون معامل التوصيل الحراري لمائع التثليج عالياً في حالتي السيولة والبخار للحصول على معامل انتقال حرارة مرتفع.

4- اللزوجة Viscosity

إن خاصية اللزوجة لمائع التثليج في حالتي السائل والبخار، تكتسب أهميتها من خلال تأثيرها في معامل انتقال الحرارة في المبخر والمكثف، وكذلك تكون عاملاً أساسياً عند تصميم الضواغط في منظومات التثليج. وللحصول على معامل انتقال حرارة عالي وقدرة ضخ واطئة، يتطلب أن تكون لزوجة المائع منخفضة، أما إذا كانت اللزوجة عالية فإن المنظومة يجب أن تكون بأنابيب ذات حجوم أكبر لتجنب الخسائر في الضغط.

5- متانة العزل الكهربائي Dielectric Strength

إن متانة العزل الكهربائي تكون ذات أهمية عندما يستخدم مائع التثليج في الوحدات التي تحتوي على ضواغط مغلقة (Hermetic Compressors) وشبه مغلقة (Semi-Hermetic)، حيث يكون المحرك الكهربائي متلامساً مع مائع التثليج، وعليه فإن مائع التثليج يجب أن يكون ذا متانة عزل كهربائي عالية جداً. وتُقاس متانة العزل الكهربائي لموائع التثليج نسبة إلى متانة العزل الكهربائي لغاز النيتروجين.

3-2-1 الخواص البيئية والأمان Environmental & Safety Properties

بالإضافة للخواص الحرارية والفيزيائية المذكورة آنفاً فإن الخواص البيئية والأمان عاملان مهمان أيضاً. وفي الحقيقة فإن موائع التثليج الصديقة للبيئة تُعد في يومنا هذا من العوامل الأساسية لتقرير مدى إمكانية استخدام مائع التثليج في تطبيق معين من عدمه. وفيما يلي أهم هذه الخواص:

1- مكافئ استنفاد الأوزون Ozone Depletion Potential (ODP)

طبقاً لبروتوكول مونتريال (Montreal Protocol) فإن مكافئ استنفاد الأوزون (ODP) لمائع التثليج يجب أن يكون صفراً (أي أن المائع لا يؤثر على طبقة الأوزون). لهذا فإن موائع التثليج التي تحتوي في تركيبها الكيميائي على ذرات الكلور (Chlorine) والبروم (Bromine) والتي تؤثر على طبقة الأوزون لا يجوز استخدامها كموائع تثليج.

2- مكافئ الاحترار العالمي Global Warming Potential (GWP)

تحتوي بعض موائع التثليج على غازات يمكن أن تفاقم ظاهرة الاحترار العالمي (GW)، وتُعد معالجة ظاهرة تناقص طبقة الأوزون ليست كافية وإنما يجب الانتباه أيضاً إلى مكافئ الاحترار العالمي، فعلى سبيل المثال فإن مائع التثليج R-134a، ذو مكافئ استنفاد للأوزون يساوي صفراً إلا أنه من الموائع ذات مكافئ احترار عالمي عالي، لذا وجب إبداله ببديل آخر مستقبلاً.

3- السُمية Toxicity

يجب أن يكون مائع التثليج غير سام ولا مضر بالصحة العامة للأشخاص الذين قد يكونون بتماس مباشر معه بسبب احتمال تسربه من المنظومة أو للعاملين في مجال التثليج خلال فترات الصيانة المختلفة. إن التسمم بموائع التثليج يعتمد بشكل أساسي على نسبة تركيزها في الهواء، إن السُمية هي عامل نسبي يعتمد على تركيز المادة السامة ومقدار زمن التعرض لها. وبهذا فإن بعض الموائع تكون

سامة رغم قلة تركيزها، والبعض الآخر متوسطة السُمية حيث تكون خطورتها معتمدة على زيادة تركيزها وطول فترة التعرض لها.

إن بعض موائع التثليج مثل الكلوروفلوروكاربونية (CFCs) والهيدروكلوروفلوروكاربونية (HCFCs) غير سامة عند اختلاطها مع الهواء بالظروف الاعتيادية، لكنها تصبح عالية السُمية عند تعرضها لشُعلة أو مُسخن كهربائي وذلك لتحللها إلى عناصر عالية السُمية. وبشكل عام فإن درجة الضرر تعتمد على:

- مقدار مائع التثليج مقارنة بالحيز الكلي.
- نوع شاغلي الحيز (نوع التطبيق المستخدمة من أجله منظومة التثليج).
- مدى وجود الشُعلة وظروف وطرق الصيانة المستخدمة.

4- الاشتعال (الاتقاد) والانفجار Flammability & Explosion

يفضل أن تكون موائع التثليج المستعملة في المنظومات المختلفة غير قابلة للاشتعال والانفجار وبخلافه يجب أن تكون هنالك احتياطات أمان خاصة لتجنب الحوادث. إن غالبية الموائع المستعملة حالياً في منظومات التثليج غير قابلة للاتقاد أو الانفجار، باستثناء الأمونيا والهيدروكربونات. إن خليط الأمونيا مع الهواء بنسبة من (16- 25) % له قابلية اشتعال، وكذلك الهيدروكربونات فإنها ذات قابلية كبيرة للاشتعال والانفجار. والاثنان يستعملان في بعض التطبيقات كون خواصهما الحرارية جيدة وذات تأثير قليل على طبقة الأوزون وظاهرة الاحترار العالمي.

4-2-1 خواص أخرى مهمة Other Important Properties

1- التآكل Corrosion

يمكن أن يسبب مائع التثليج تآكلاً لأجزاء منظومة التثليج، لذا يجب اختيار مائع التثليج بدقة وذلك بتوافقه مع أجزاء المنظومة بحيث لا يسبب تآكل أجزاء المنظومة، كما إنه يجب أن يكون خاملاً كيميائياً ضمن مدى درجات الحرارة التي تعمل عليها المنظومة. وبصورة عامة لا تسبب الهالوكاربونات التآكل لجميع المعادن، إلا إنها تصبح حامضية بوجود الماء والهواء. إما الأمونيا فإنها تؤثر في المعادن غير الحديدية عند وجود الماء مثل الأنابيب المصنوعة من النحاس، لذلك يستعمل الفولاذ في منظومات التثليج التي يكون الأمونيا مائعاً للتثليج فيها.

2-الاستقرار الكيميائي Chemical Stability

إن موائع التثليج يجب أن تكون مستقرة كيميائياً مهما طالت فترة استخدامها في المنظومة، وغير قابلة للتحلل عند درجات الحرارة العاملة لمنظومة التثليج. بعض الموائع ونتيجة تحفيز بعض المعادن ينتج عن تحللها غازات غير قابلة للتكثف مسببة ارتفاع ضغط المكثف، لهذا يجب أن تكون موائع التثليج خاملة كيميائياً مع جميع المواد المستعملة في تصنيع أجزاء منظومات التثليج.

3-الرائحة Odor

إن رائحة مائع التثليج قد تكون متميزة تساعد أحياناً على اكتشاف التسرب، وأحياناً تكون سبباً للإضرار بالمواد المخزونة وخصوصاً المواد الغذائية ذات الحساسية العالية (مثل اللحم الذي يفقد طعمه عند تلامسه مع الأمونيا). كما إن هنالك موائع تثليج عديمة الرائحة أو ذات رائحة قليلة جداً.

4-سهولة الكشف عن التسرب Ease of Leak Detection

يجب أن تكون عملية الكشف عن تسرب مائع التثليج من الدورة سهلة وممكنة وبالطرائق التقليدية، ويكون تسرب مائع التثليج إلى خارج الدورة إذا كان ضغط التبخير أكبر من الضغط الجوي، أما إذا كان ضغط التبخير أقل من الضغط الجوي فإن التسرب يكون من الخارج إلى داخل المنظومة (الهواء الخارجي سوف يدخل خلال أنابيب منظومة التثليج) وهنا يصعب كشف التسرب.

5-الامتزاج مع زيت التزييت Miscibility with Lubricating Oil

إن مائع التثليج يجب أن يكون في حالة استقرار كيميائي وطبيعي مع وجود الزيت كي لا يكون هنالك تأثير في الزيت والمائع معاً عند تلامسهما. ولهذا نرى أن موائع التثليج يمكن أن تقسم إلى ثلاث مجاميع اعتماداً على قابلية امتزاجها مع زيت التزييت وهي:

- مجموعة تمتزج بالزيت كلياً مثل (R-11 ، R-12 ، R-113) حيث إن الزيت الذي يصل المبخر يرجع للضاغط ممتزجاً بمائع التثليج مرة أخرى، وأي جزء منفصل عن المائع يتم إرجاعه إما بواسطة التثاقل أو بواسطة السحب للغاز بسرعة عالية (خصوصية تصميم خط السحب بالمنظومة).

- مجموعة تمتزج بالزيت جزئياً حيث تقسم هذه المجموعة إلى موائع ذات امتزاجيه منخفضة مثل (R-13 ، R-502)، موائع ذات امتزاجيه متوسطة مثل (R-22 ، R-114) وأخرى ذات امتزاجيه عالية مثل ($R\text{-}13B_1$ ، R-501) ولهذه المجموعة يتطلب بعض الاحتياطات التصميمية لضمان رجوع الزيت إلى الضاغط.

- مجموعة لا تمتزج بالزيت، مثل الأمونيا وثاني أوكسيد الكاربون، والتي تتطلب تركيب جهاز فاصل الزيت بعد الضاغط في خط التصريف لمنع الزيت من الوصول للمكثف وإعادته إلى ضاغط المنظومة.

6- الخواص الاقتصادية Economic Properties

يفضل أن تكون موائع التثليج المستعملة قليلة الكلفة وسهلة التوافر. وهنا يجب أن يؤخذ بنظر الاعتبار الكلفة الابتدائية وكلفة الصيانة والإصلاح اعتماداً على سعة منظومة التثليج. كمقارنة لموائع التثليج يُعد الأمونيا أرخص الموائع يليه R-12 ثم R-22.

3-1 موائع التثليج وطبقة الأوزون Refrigerants & Ozone Layer

طبقة الأوزون عبارة عن طبقة رقيقة تحتوي على غاز الأوزون (O_3) تحيط بالغلاف الجوي للكرة الأرضية على ارتفاع يتراوح بين 8-20 كم. تعمل طبقة الأوزون كمرشح (Filter) لأشعة الشمس فوق البنفسجية UV (Ultraviolet) لحماية الحياة على الكرة الأرضية.

إن الأشعة فوق البنفسجية عبارة عن إشعاعات غير مرئية ذات طول موجي بين 0.03 إلى 0.40 مايكرومتر. إن تسرب كمية كبيرة من الأشعة فوق البنفسجية إلى الأرض يسبب: سرطان الجلد، إعتام عدسة عين الإنسان، ضعف نظام المناعة عند الكائنات الحية، التقليل من إنتاجية المحاصيل الزراعية، والتأثير في الكائنات البحرية.

لقد تبين للعلماء إن أحد أسباب اضمحلال طبقة الأوزون، هو وجود المركبات الكلوروفلوروكاربونية Chlorofluorocarbons (CFCs) المستخدمة كموائع تثليج. حيث إن الأشعة فوق البنفسجية تحلل هذه المركبات إلى ذرات الفلور والكلور والكاربون. يقوم عنصر الكلور باضمحلال طبقة الأوزون مسبباً زيادة تسرب الأشعة فوق البنفسجية إلى الأرض والشكل (1-1) يبين الآثار التدميرية في الأرض بفعل المركبات الكلوروفلوروكاربونية. ويبين الشكل (1-2) عمل المركبات الكلوروفلوروكاربونية في تحطم طبقة الأوزون من خلال تفاعل الكلور (Cl) مع الأوزون (O_3). ويمكن تلخيص العملية كما يأتي:

عندما تصطدم مركبات الكلوروفلوروكربونات بأشعة الشمس فوق البنفسجية فإنها تتحلل لتعطي ذرة كلور حرة.

$$R\text{-}11\ (CFCl_3) \xrightarrow{UV} CFCl_2 + Cl\ (\text{ذرة كلور حرة})$$

تهاجم ذرة كلور حرة غير مستقرة ذرة أوزون غير مستقرة وتسلب منها ذرة أوكسجين وتحول الباقي إلى جزيئة أوكسجين مستقرة وجزيئة أوكسيد الكلور غير المستقرة وكما يأتي:

$$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$$

وهنا يلاحظ إن الأيون الفعال (ClO) لا يبقى بهذه الصورة مدة زمنية طويلة، بل سيتفاعل مع ذرة أوكسجين حرة، كما يأتي:

$$ClO + O \rightarrow Cl + O_2$$

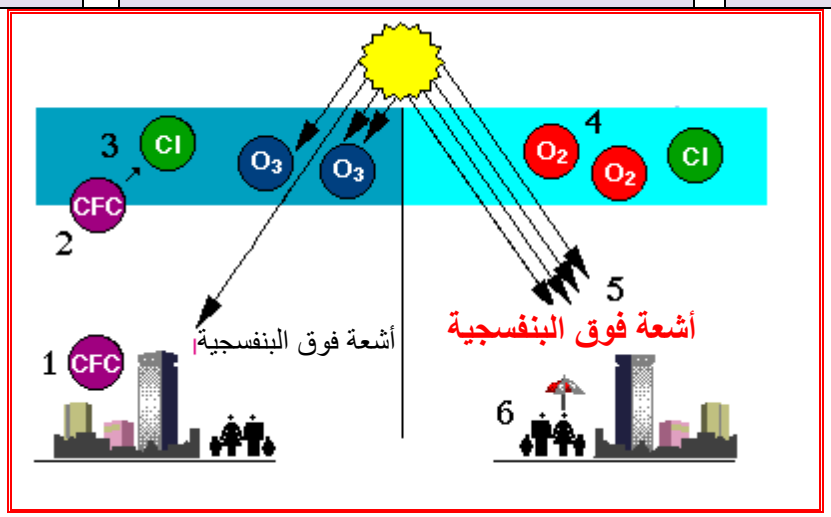
ومن العلاقة الأخيرة، يلاحظ عودة ذرة الكلور الفعال مرة أخرى، ولهذا نجد إن (ClO) يسلك سلوك عامل مساعد لسلسلة من التفاعلات الكيماوية حيث يقدر العلماء من خلال التجارب المختبرية لتأثير الكلور في جزيئات الأوزون، إن ذرة الكلور الواحدة لها قابلية تدمير بحدود 100000 جزيئة من الأوزون. ومع استمرار هذه العملية يتم اضمحلال طبقة الأوزون. حيث يلاحظ مقدار تآكل طبقة الأوزون بسبب جزئ واحد من الكلور وعليك أن تقدر حجم المشكلة ومقدار التأثير الكبير لموائع التثليج على هذه الطبقة.

يسمى تأثير موائع التثليج الكلوروفلوروكاربونية CFCs على طبقة الأوزون بمكافئ استنفاد الأوزون Ozone Depletion Potential (ODP). ويعرف مكافئ استنفاد الأوزون على إنه مقدار تناقص الأوزون بسبب باوند واحد (1 Ib) من أي هالوكاربون نسبة إلى التناقص الذي يحدثه باوند واحد من مائع التثليج R-11. لهذا فإن (ODP =1) لمائع التثليج R-11 و (ODP = 0.05) لمائع التثليج R-22.

والجدول (1-2) يوضح قيم مكافئ استنفاد الأوزون لبعض موائع التثليج. إن إمكانية موائع التثليج CFCs التدميرية لطبقة الأوزون تتراوح بين 1 إلى 10.6.

جدول 1-2 مكافئ استنفاد الأوزون لبعض موائع التثليج

مائع التثليج		الصيغة الكيميائية		مكافئ استنفاد الأوزون
CFC-11		CCl_3F		1.00
CFC-12		CCl_2F_2		1.00
CFC-113		CCl_2FCClF_2		0.90
CFC-114		$CClF_2CF_3$		0.85
CFC-115		$CClF_2CF_3$		0.44
Halon-1301		CF_3Br		16.00
CFC/HFC-500		CFC-12(73.8%)/HFC-152a (26.2%)		0.738
CFC-HFCFC-502		HCFC-22(48.8%)/CFC-115(51.2%)		0.25
HCFC-22		$CHClF_2$		0.05
HCFC-123		$CHCl_2CF_3$		0.02-0.06
HCFC-124		$CHClFCF_3$		0.02-0.04
HCFC-142b		CH_3CClF_2		0.065
HFC-125		CHF_2CF_3		0.00
HFC-134a		CH_2FCF_3		0.00
HFC-152a		CH_3CHF_2		0.00



1- تسرب موائع التثليج CFCs.

2- ارتفاع المركبات إلى طبقة الأوزون.

3- تحرر ذرة كلور بسبب الأشعة فوق البنفسجية.

4- يتحول الأوزون إلى أوكسجين بفعل الكلور.

5- اضمحلال طبقة الأوزون.

6- مرور الأشعة فوق البنفسجية بصورة أكبر وتأثير سلبي في البيئة.

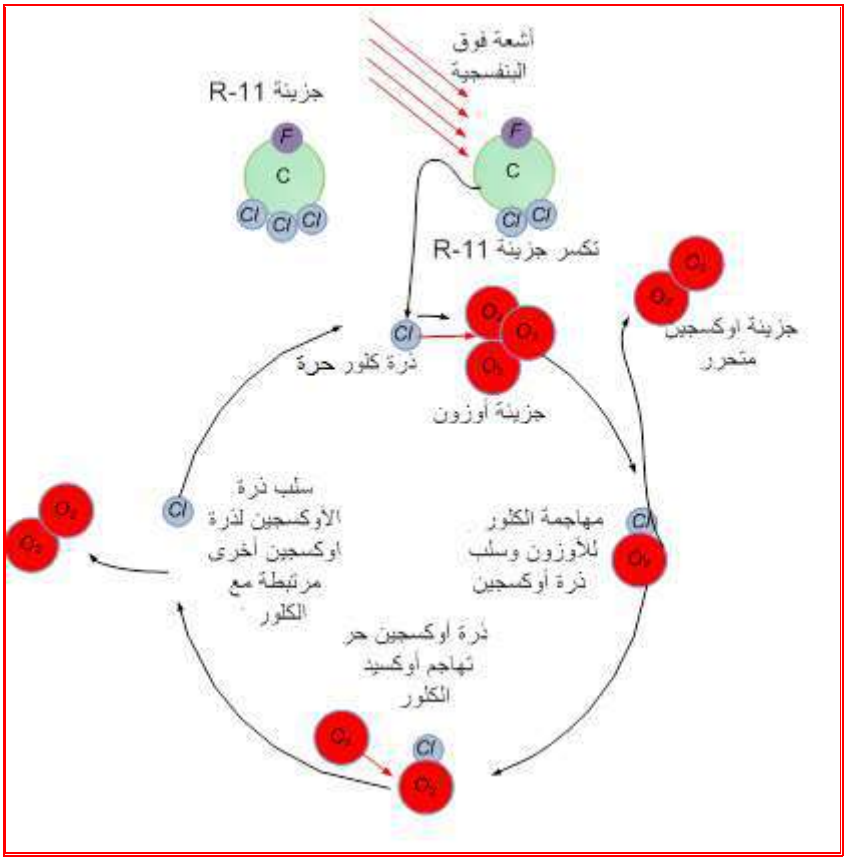
شكل 1-1 تأثير اضمحلال طبقة الأوزون في الأرض بفعل المركبات الكلوروفلوروكاربونية

1-3-1 اتفاقية فيَنا وبروتوكول مونتريال Vienna Convention & Montreal Protocol

وقع العديد من دول العالم على اتفاقية فيَنا لحماية طبقة الأوزون في عام 1985 ووقع على بروتوكول مونتريال في عام 1987، إدراكاً من العالم بأهمية المحافظة على طبقة الأوزون.

ينص بروتوكول مونتريال لحماية طبقة الأوزون على التخلص تدريجياً من إنتاج واستخدام موائع التثليج الكلوروفلوروكاربونية (CFCs) وكما يأتي:

1. التخلص من إنتاج موائع التثليج R-11 و R-12 في الفترة من 1986 – 2000.
2. التخلص من موائع التثليج HCFCs في الفترة ما بين 2015 -2020 وخاصة R-22.
3. الاتفاقية استثنت الدول النامية في الفترة الابتدائية حتى عام 2005.
4. تم إنتاج بدائل لموائع التثليج صديقة للأوزون مثل R-134a.
5. إعادة استعمال موائع التثليج مرة أخرى بعد تنقيتها وتنظيفها.



شكل 1-2 يوضح طريقة تفاعل الكلور مع الأوزون

تُعد اتفاقية فيَنا اتفاقية متبادلة بين الدول المتقدمة والدول النامية، إذ تقوم الدول النامية بموجبها بالتخلص التدريجي من المواد المستنفدة لطبقة الأوزون، مقابل قيام الدول المتقدمة بتقديم المساعدات المالية والفنية للدول النامية لتمكينها من الإيفاء بالتزاماتها. ومن أهم أهداف هذه الاتفاقية ما يأتي:

أ- المحافظة على طبقة الأوزون.
ب- تسهيل نقل وتوطين التكنولوجيا السليمة في الدول النامية.
ت- تعزيز الوعي بقضايا الأوزون لدى كافة شرائح المجتمع.
ث- بناء القدرات الوطنية.

بموجب بروتوكول مونتريال فقد توقفت الدول المتقدمة عن إنتاج واستعمال المواد المستنفدة لطبقة الأوزون منذ عام 1996، وقد حدد البروتوكول المواعيد التالية للدول النامية لخفض استهلاكها والتوقف عن استعمال المواد المستنفدة لطبقة الأوزون.

أ- تخفيض مستويات الاستهلاك 1999/1/1.
ب- خفض 50% من الاستهلاك في عام 2005.
ت- خفض 85% من مستوى الاستهلاك عام 2007.
ث- التوقف النهائي عن الاستهلاك عام 2010.

وتجدر الإشارة إلى أن هنالك أكثر من تعديل وتغيير على الاتفاقية منها تغيير فيَنا عام 1995، تعديل وتغيير مونتريال عام 1997، تعديل وتغيير بكين عام 1999. وكان لهذه التعديلات أثر كبير في تحسين الآلية المالية والفنية لخطوات التخلص من موائع التثليج الضارة، فضلاً على إدخال مواد جديدة خاضعة للرقابة واعتماد التشريعات اللازمة لضبط خفض استعمال المواد المستنفدة لطبقة الأوزون.

انضم العراق إلى هذه الاتفاقية والبروتوكول بتاريخ 25-6-2008، ليصبح البلد رقم 193 بين دول العالم. ينتمي العراق إلى الشبكة الإقليمية لدول غرب آسيا (REWA) مع الأردن وسوريا ولبنان ودول مجلس التعاون الخليجي.

4-1 موائع التثليج البديلة Alternative Refrigerants

لقد طورت واستخدمت الموائع الكلوروفلوروكاربونية CFCs كموائع تثليج منذ عام 1930، وكانت موائع تمتاز بالأمان وعدم الاشتعال وغير سامة. وفي ثمانينات القرن الماضي ظهر التأثير التدميري لهذه الموائع على طبقة الأوزون، وكما أشير سابقاً في هذا الفصل فقد وضعت ضوابط عالمية لإيقاف استخدامها.

وقد استخدمت الموائع الهيدروفلوروكاربونية HFCs كمواد بديلة انتقالية لـ CFCs، لكونها أقل تأثيراً على طبقة الأوزون. كما بينت الدراسات إن المواد الهيدروفلوروكاربونية HFCs ذات تأثير قليل جداً على طبقة الأوزون ويمكن استخدامها كموائع تثليج بديلة لـ CFCs، لأنها (HFCs) تمتاز بالأمان، وإنها غير قابلة للاشتعال ولا تسبب التآكل ولا تحدث ضباباً دخانياً. كمحصلة للجهود العلمية وللحفاظ على البيئة فقد أصبحت HFCs و HCFCs البدائل الانتقالية للموائع الـ CFCs. لكن تأثير HFCs في ظاهرة الاحترار العالمي، كانت السبب الأساسي لاستمرار البحث عن بدائل أخرى، تكون صديقة للبيئة.

لهذه الأسباب عادت الفكرة إلى إعادة استخدام موائع تثليج ذات سُمية أو قابلية اشتعال مثل الأمونيا والهيدروكربونات بدلاً عن HFCs. وخلاصة القول إن الموائع التي تعتبر حالياً البدائل الأساسية للموائع CFCs هي الأمونيا، ثاني أوكسيد الكاربون، والهيدروكربونات وخلائطها.

1-4-1 الأمونيا Ammonia NH_3

الأمونيا NH_3 (R-717) التي تمتاز بخصائص تثليجية جيدة وعديمة التأثير على طبقة الأوزون وليس لها تأثير في ظاهرة الاحترار العالمي، تمتاز بخواص حرارية جيدة جداً، ومن ميزاتها أن الطاقة المصروفة لإنتاج طن تثليج واحد هي أقل من مثيلاتها من موائع التثليج، فضلاً على تميزها برائحة حادة يمكن تحسسها مهما تكن نسبتها في الهواء، كما أنها أخف من الهواء. إلا أنها سامة وقابلة للاشتعال في ظروف محددة ولا تستعمل مع الأنابيب النحاسية بسبب تآكل الأنابيب نتيجة تماسها مع الأمونيا.

2-4-1 ثاني أوكسيد الكاربون Carbon Dioxide CO_2

ثاني أوكسيد الكاربون R-744 من موائع التثليج التي كانت تستعمل بشكل واسع قبل أن يتم استبدالها بالموائع CFCs وتوقف العمل بها بحدود عام 1950، وعلى الرغم من أن غاز ثاني أوكسيد الكاربون هو المسبب لظاهرة الاحترار العالمي، إلا أن تأثيره في ظاهرة الاحترار العالمي أقل بآلاف المرات من تلك التي تسببها موائع التثليج من النوع HFCs. هذا فضلاً على رخص ثمنه وامتيازاته الحرارية العالية جداً، دعت إلى العودة لاستعماله كمائع تثليج بديل. ومن أهم خصائص غاز ثاني أوكسيد الكاربون ما يأتي:

أ- تعمل المنظومة العاملة بغاز CO_2 تحت ضغط عالٍ وقد تكون أعلى من تلك العاملة بالمائع R-410A.

ب- أقل تأثيراً في سلامة الإنسان ولكن يتطلب أن يكون مستوى تركيزه قليل في المناطق المشغولة.

ت- أثقل من الهواء وكذلك من الهيدوفلوروكاربونات.

ث- يمكن استعماله مع الأنابيب النحاسية.

ج- درجة حرارته الحرجة منخفضة.

ح- لا يمكن الحصول عليه بالحالة السائلة تحت ضغط أقل من 520 kPa، بل على شكل ثلج جاف Dry Ice.

خ- يكون مناسباً كمائع تثليج للمنظومات العاملة بدرجات حرارة منخفضة.

د- يمكن استعماله كبديل لـ HFCs في المنظومات التعاقبية.

التطبيقات التي يمكن أن يستعمل فيها ثاني أوكسيد الكاربون كمائع تثليج هي:

1. مخازن التثليج.
2. أنظمة التثليج في المحلات التجارية.
3. المضخات الحرارية.

3-4-1 الهيدروكربونات Hydrocarbons HCs

تعد الهيدروكربونات من موائع التثليج الممتازة، وتوجد في محيطنا بصورة طبيعية، أي أنها غير مصنعة ومنها الإيثان C_2H_6 (R-170)، والبروبان C_3H_8 (R-290) ، والبيوتان (R-600) C_4H_{10} والآيسوبيوتان (R-600a) C_4H_{10} وأخيراً البروبلين C_3H_6 (R-1270)، ويمكن للهيدروكربونات أن تكون مناسبة لكثير من التطبيقات، بعد أن يتم التأكد من عامل الأمان عند استعمالها.

تمتاز الهيدروكربونات برخص الثمن وخواصها الحرارية الممتازة مقارنة بموائع التثليج من النوع HFCs، إضافة إلى أن الضواغط التي تتعامل مع الهيدروكربونات تحتاج إلى زيوت معدنية، وهي ثابتة كيميائياً. وقد انتشر استخدامها خارج معامل البتروكيمياويات، إلا أن لها قابلية اشتعال عندما يكون تركيزها في الهواء بين 2 و 10 %، وهذه الخاصية تتطلب الانتباه. وعند إمكانية تحقيق عنصر الأمان، يمكن أن تكون الهيدروكربونات بدائل للموائع HFCs في أغلب منظومات التثليج الصغيرة والمتوسطة.

التطبيقات التي يمكن استخدام HCs كموائع تثليج هي:

أ- أجهزة التثليج المنزلية.

ب- المنظومات التعاقبية مع غاز ثاني أوكسيد الكاربون.

4-4-1 الخلائط الطبيعية Natural mixtures

يمكن إنتاج موائع تثليج جديدة عن طريق خلط عددٍ من موائع التثليج الطبيعية بنسب وزنية مختلفة، ومن هذه الخلائط هو خليط الأمونيا مع الهيدروكربونات أو ثاني أوكسيد الكاربون مع الهيدروكربونات، ولا يجوز خلط الأمونيا مع ثاني أوكسيد الكاربون، لأن الناتج سيكون مادة سامة جداً. وهنالك من الخلائط الطبيعية المستخدم حالياً هو R-723 (خليط مكون من الأمونيا بنسبة 60% والدايمثيل بنسبة 40%)، والمتوافر تجارياً في الوقت الحاضر في أوربا كبديل للمائع R-22. ورغم أنه لا يختلف عن الأمونيا من ناحية السلامة، إلا أن R-723 يمتاز عن الأمونيا بما يأتي:

أ- يكون له معامل أداء أعلى من الأمونيا.

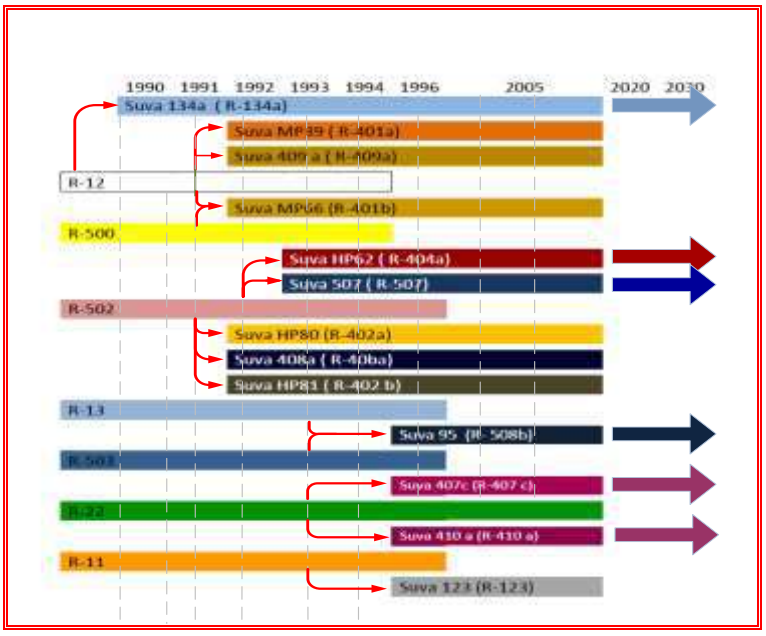
ب- تكون درجة حرارة تصريف الضاغط أقل مما لو كان الأمونيا مائع تثليج.

ت- له قابلية امتزاج بالزيت أفضل من الأمونيا.

لقد تم إنتاج بدائل لموائع التثليج بخواص لا تؤثر على طبقة الأوزون، لاستخدامها في مختلف مجالات التثليج وتكييف الهواء بدلاً من موائع التثليج القديمة، وكما هو موضح بالجدول (1-3) والشكل (1-3) مع استخداماتها.

جدول 1-3 موائع التثليج البديلة

نوع البديل	موائع التثليج المراد إبدالها			
	CFC-11	CFC-12	CFC-502	HCFC-22
البديل HCFC منظومات جديدة أو إعادة تأهيل المنظومات القديمة	123	401A	402A	غير موجود
		401B	402B	
		409A	403A	
		409B	403B	
			408A	
			411B	
البديل HFC منظومات جديدة أو إعادة تأهيل المنظومات القديمة	134a جديد فقط	134a	404A	407C
		413A	407A	417A
			407B	410A جديد فقط
			507	134a جديد فقط
بدائل أخرى منظومات جديدة فقط	أمونيا	HC	HC	HC
		أمونيا	أمونيا	أمونيا



شكل 1-3 مخطط استبدال موائع التثليج حسب السنين

5-1 الرطوبة في موائع التثليج Moisture in Refrigerants

عند اختلاط الرطوبة (بخار الماء) مع أغلب موائع التثليج تسبب مشاكل كثيره لمنظومات التثليج يتطلب معالجتها. فإذا كان وجود الرطوبة في المنظومة بطور السائل فإنها ستكون محلولاً مع مائع التثليج يتسبب في تعرض أجهزة التحكم للتلف أو الانسداد نتيجة انجماد الماء فيها أو في المبخر عند درجات الحرارة المنخفضة. إما عند وجود الماء مع موائع التثليج عند درجات الحرارة العالية (بعد الضاغط)، فإن موائع التثليج قد تتحلل وتتحد مع الماء مكونة أحماض ضارة تتفاعل مع زيت الضاغط ومع المواد الأخرى مسببة بذلك التآكل أو الصدأ لأجزاء المنظومة المعدنية مما يقلل من عمر المنظومة التشغيلي (وخصوصاً في المنظومات ذات الضواغط المغلقة التي لا يمكن الكشف عن حالة الزيت بداخلها في أثناء ظروف العمل). ويجب تحديد نسبة الرطوبة المسموح بها داخل منظومة التثليج وذلك بسبب صعوبة إزالتها من مائع التثليج بشكل كامل، ويختلف ضرر وجود الرطوبة في منظومة التثليج حسب درجة حرارة وجود الرطوبة. ويبين الجدول (1-4) نسبة الرطوبة المسموح بها مع كل مائع من موائع التثليج بوحدات جزء رطوبة لكل مليون جزء من مائع التثليج ppm، في حين أن الجدول (1-5) يبين نسبة الرطوبة عند درجات الحرارة المختلفة. كما إن الرطوبة يمكن معالجتها إذا كانت ضمن الحدود المسموح بها من خلال استخدام مجففات حبيبات السليكاجل Silica Gel Drier وحسب درجة حرارة المنظومة، ويلاحظ من الجدول العلاقة الطردية بين نسبة الرطوبة ودرجة الحرارة. وكذلك يمكن ملاحظة أن مائع التثليج R-22 ذو قابلية كبيرة على امتصاص الرطوبة أكبر بكثير من R-134a لذلك لا يحدث انجماد الرطوبة في المنظومات التي تستخدم هذا المائع.

جدول1-4 الرطوبة المسموح بها لبعض موائع التثليج

مائع التثليج	النسبة المسموح بها جزء لكل مليون جزء	اقصى نسبة مسموح بها جزء لكل مليون جزء
R-134a	أقل من 5	15
R-22	أقل من 30	100
R-502	أقل من 15	50

جدول 1-5 نسبة الرطوبة عند درجات حرارة مختلفة

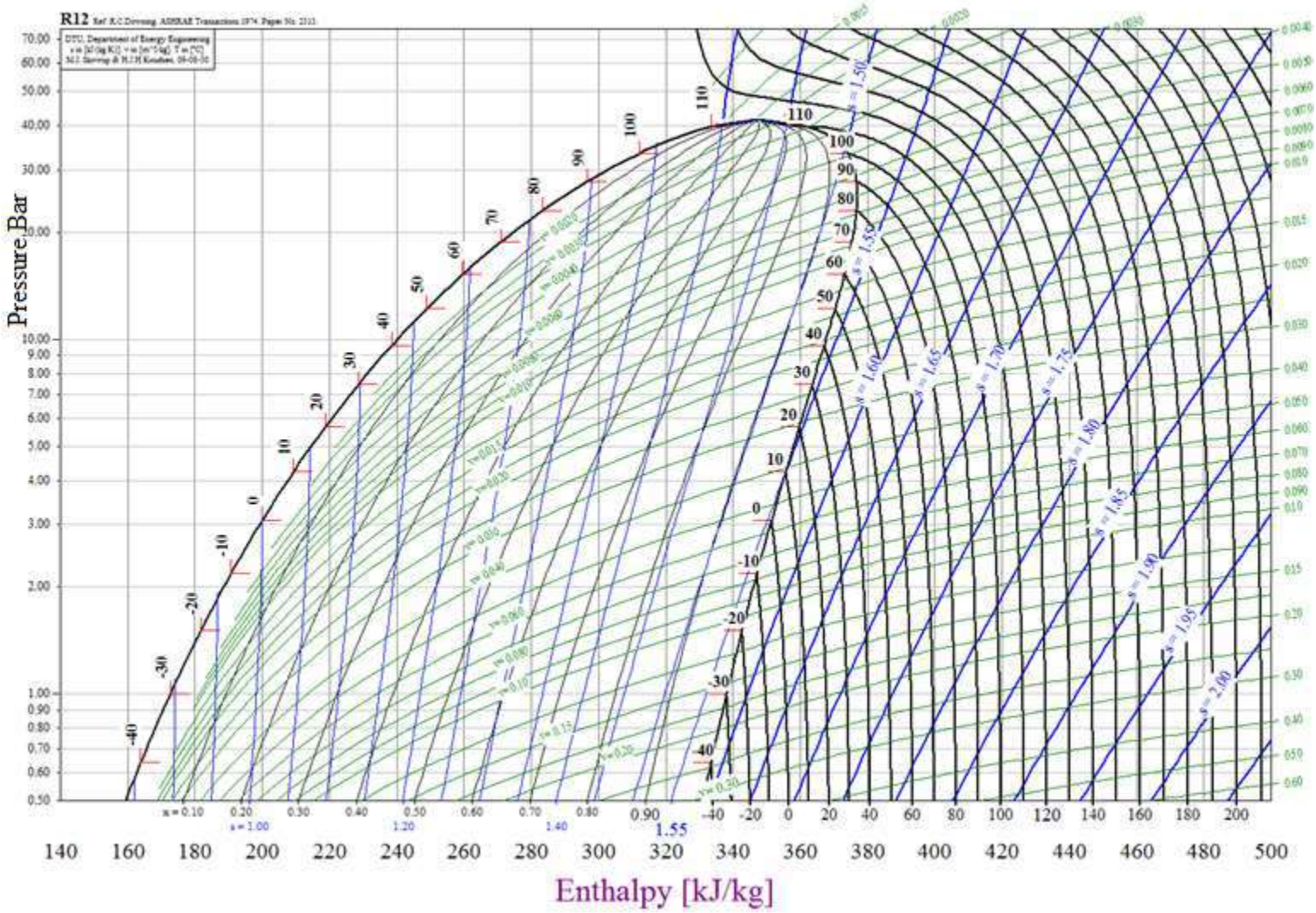
درجة الحرارة	نسبة الرطوبة لكل مائع (ppm)				
	R-12	R-22	R-500	R-502	R-13B1
-40	1.7	120	48	40	2
-20	3.8	195	81	69	5
0	8.3	308	129	115	10
20	17	472	200	180	21
40	32	690	293	278	40

6-1 اختيار موائع التثليج Refrigerant Selection

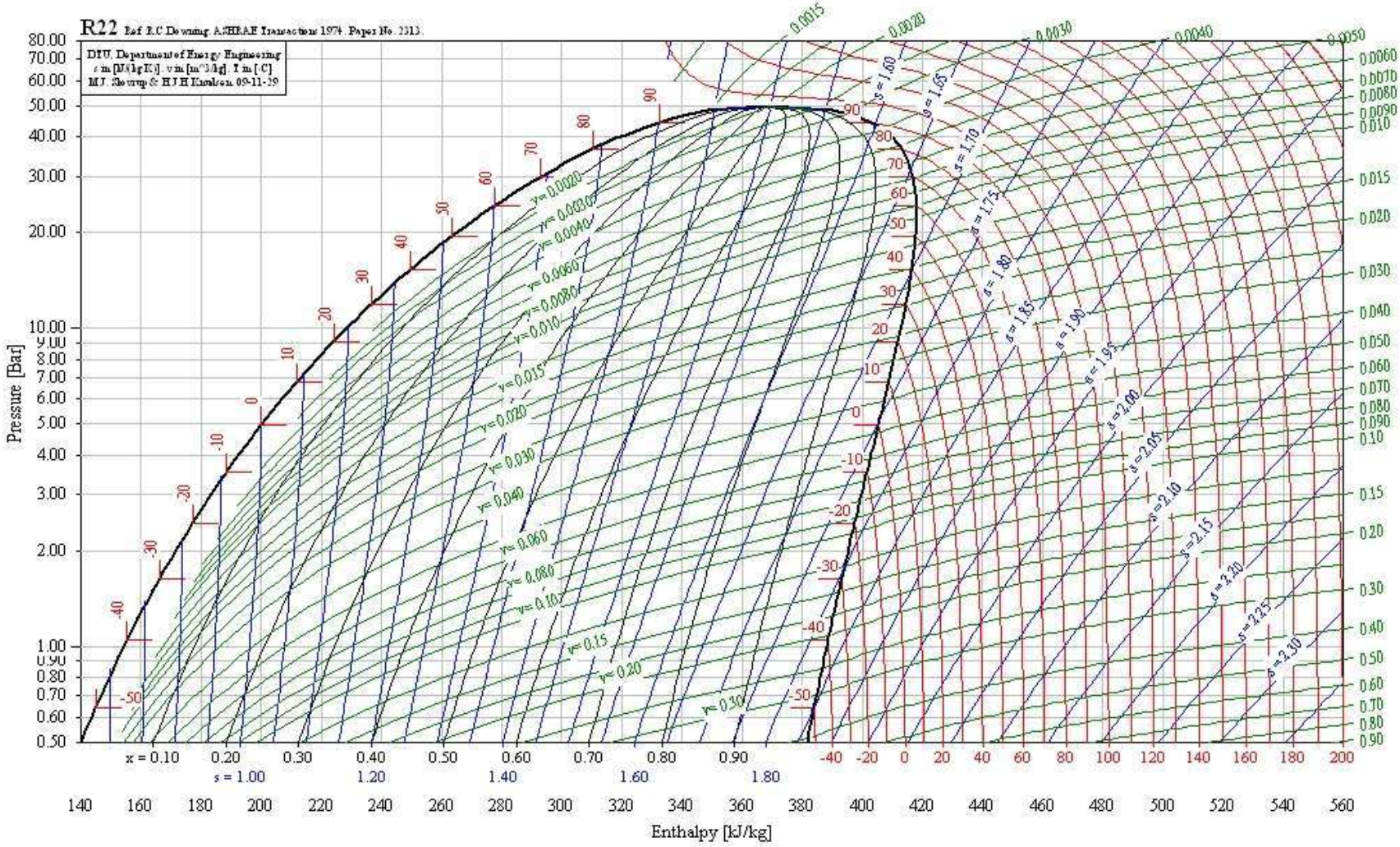
لغرض اختيار مائع التثليج يجب أن تؤخذ كافة الخواص التي تمت الإشارة إليها، مع دراسة نوع التطبيق، لأن الخواص ونوع التطبيق هما العاملان الأساسيان لاختيار مائع التثليج، كما تجدر الإشارة إنه لا يوجد مائع تثليج يمكن استخدامه لجميع التطبيقات، لأن التطبيقات المختلفة تتطلب خواص مختلفة.

يجب الاهتمام بالخواص الأساسية التالية عند اختيار مائع التثليج ونوع الضاغط:

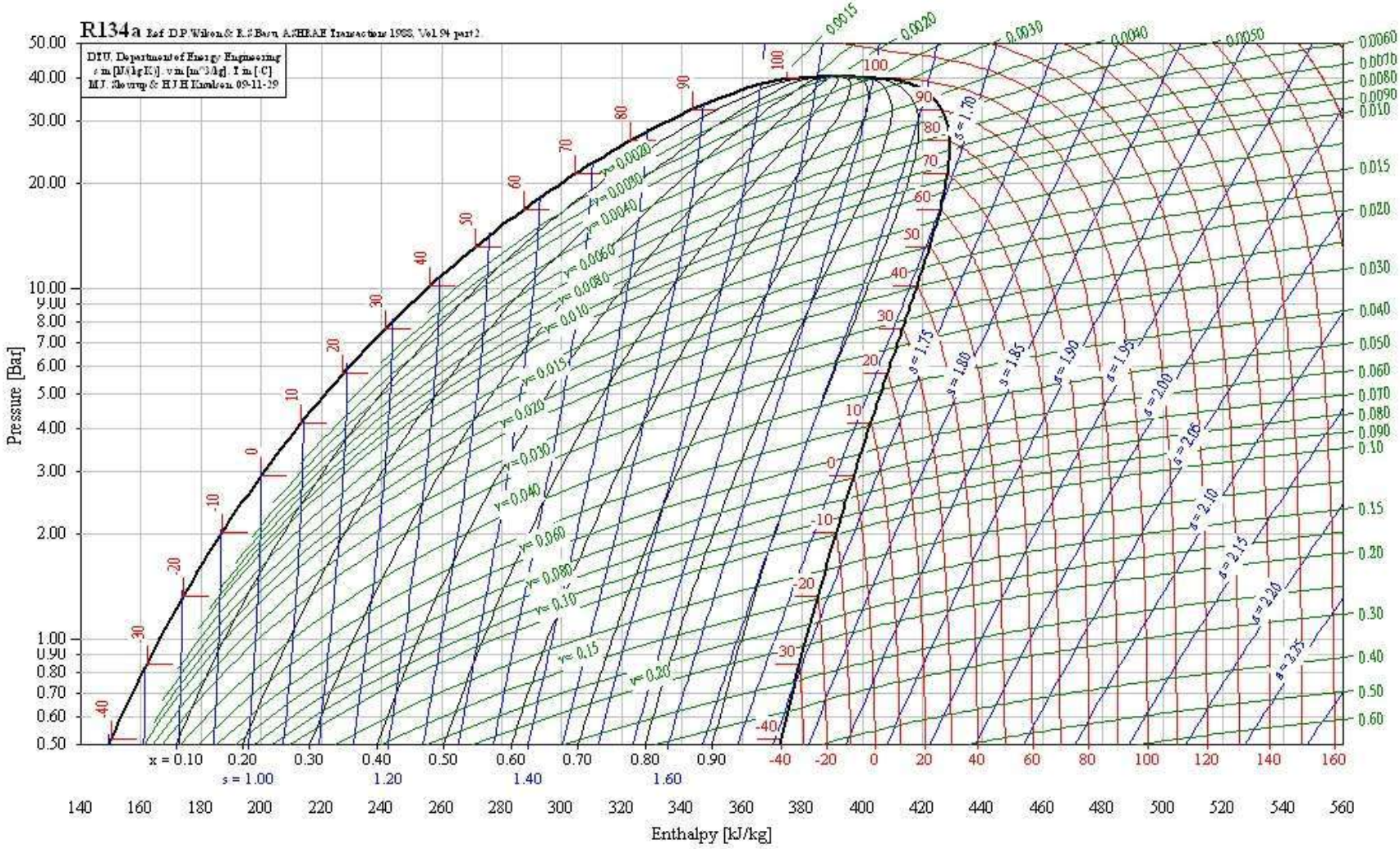
1. **أن يكون المائع صديقاً للبيئة.**
2. **مدى الضغوط التشغيلية ونسبة الانضغاط.**
3. **درجة حرارة المبخر.**
4. **قابلية الامتزاج بالزيت.**



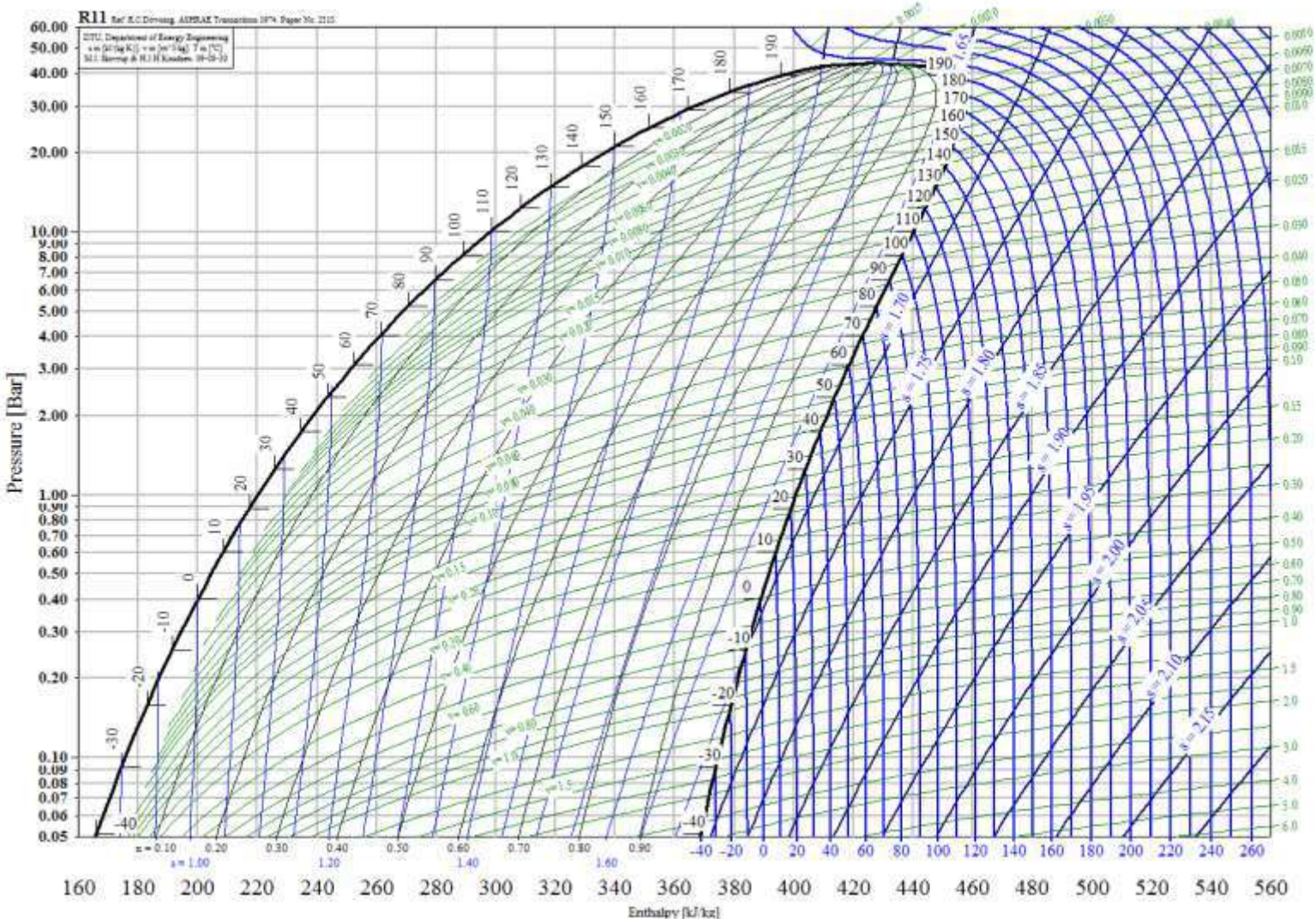
مخطط 1-1 ضغط – محتوى حراري لمائع التثليج R-12



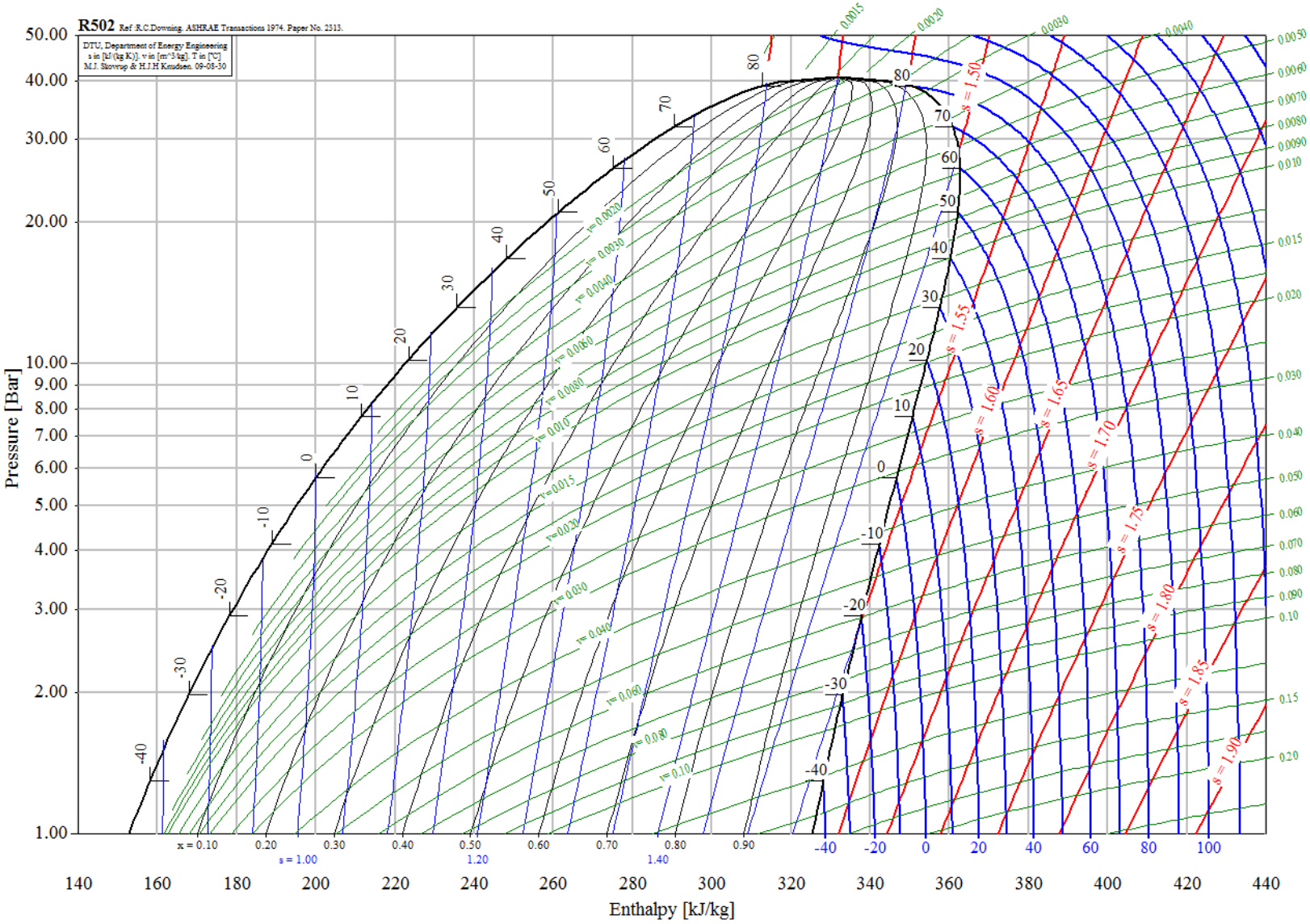
مخطط 1-2 ضغط ـ محتوى حراري لمائع التثليج R-22



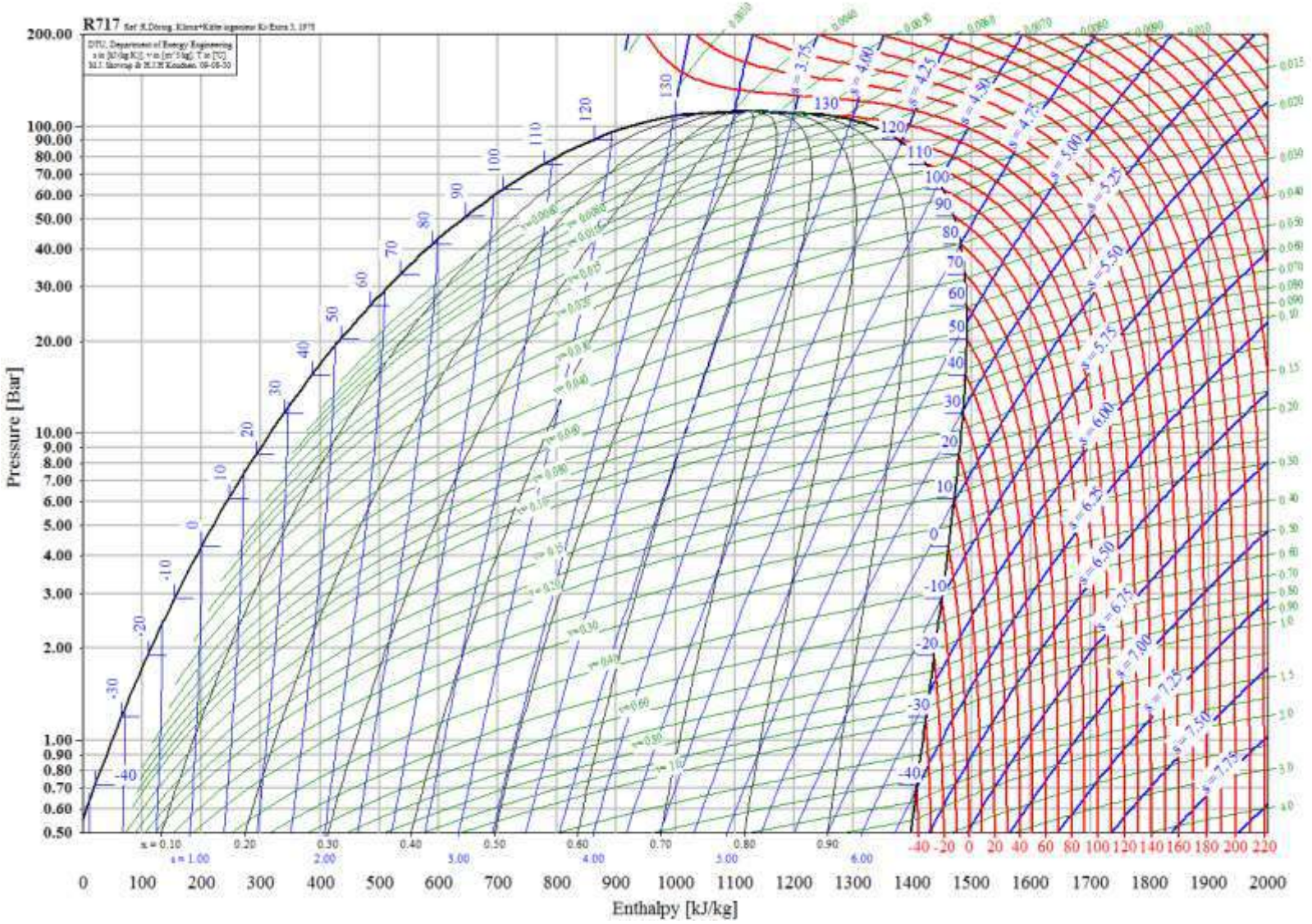
مخطط 1-3 ضغط ـ محتوى حراري لمائع التثليج R-134a



مخطط 1-4 ضغط – محتوى حراري لمائع التثليجR-11



مخطط 1-5 ضغط – محتوى حراري لمائع التثليج R-502



مخطط 1-6 ضغط – محتوى حراري للأمونيا R-717

أسئلة الفصل الأول

س1) عرّف ما يأتي:

مائع التثليج، الهيدروكربونات، موائع التثليج البديلة، موائع التثليج الانتقالية، مكافئ استنفاد الأوزون، مكافئ الاحترار العالمي، نسبة الانضغاط، اللزوجة، الخلائط الطبيعية.

س2) أذكر أهم الخواص الواجب مراعاتها لاختيار مائع تثليج؟

س3) علل ما يأتي:

أ- اضمحلال طبقة الأوزون.

ب- استعمال الأنابيب الفولاذية بدل النحاسية في منظومات التثليج التي تعمل بالأمونيا.

ج- استعمال الأمونيا كمائع تثليج على الرغم من كونه ساماً وقابلاً للاشتعال والانفجار.

د- وجود ظاهرة الاحترار العالمي.

هـ- العودة لاستعمال غاز ثاني أوكسيد الكاربون كمائع تثليج في بعض منظومات التثليج.

س4) اذكر الموائع البديلة لكل من موائع التثليج التالية:

R-134a R-11 R-12 R-22

س5) عدد خواص موائع التثليج الحرارية، البيئية، والأمان.

س6) اذكر خواص المائع R-723، وقارنها مع خواص الأمونيا.

س7) رتب موائع التثليج ترتيبا تصاعدياً حسب تأثيرها على طبقة الأوزون:

R-134a R-22 R-12 R-11

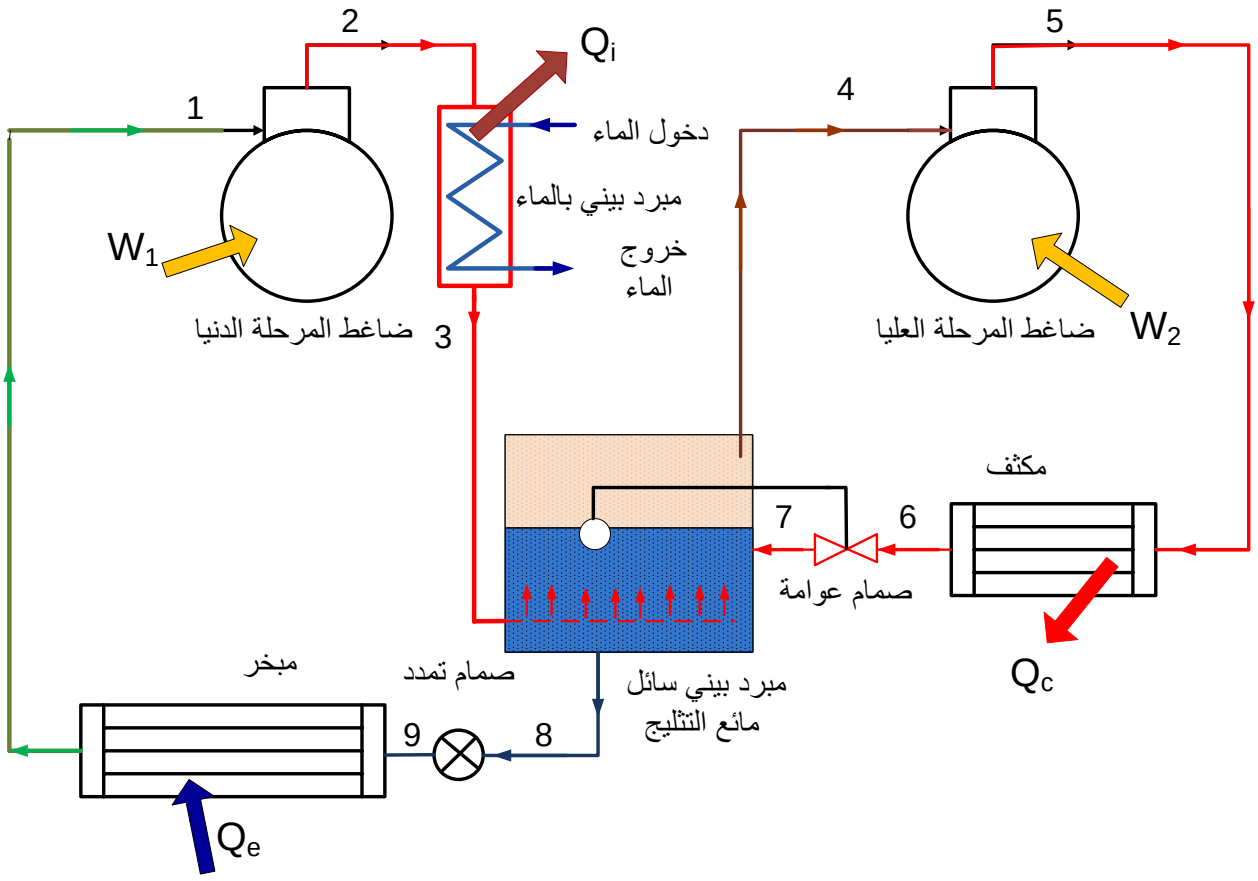
س8) ما هو بروتوكول مونتريال؟ وما هي بنود اتفاقية فيَنا؟

س9) ماذا تعرف عن ظاهرة البيت الزجاجي؟ (ابحث عن ذلك).

الفصل الثاني

منظومات التثليج المركبة

Compound Refrigeration Systems



منظومات التثليج المركبة

Compound Refrigeration Systems

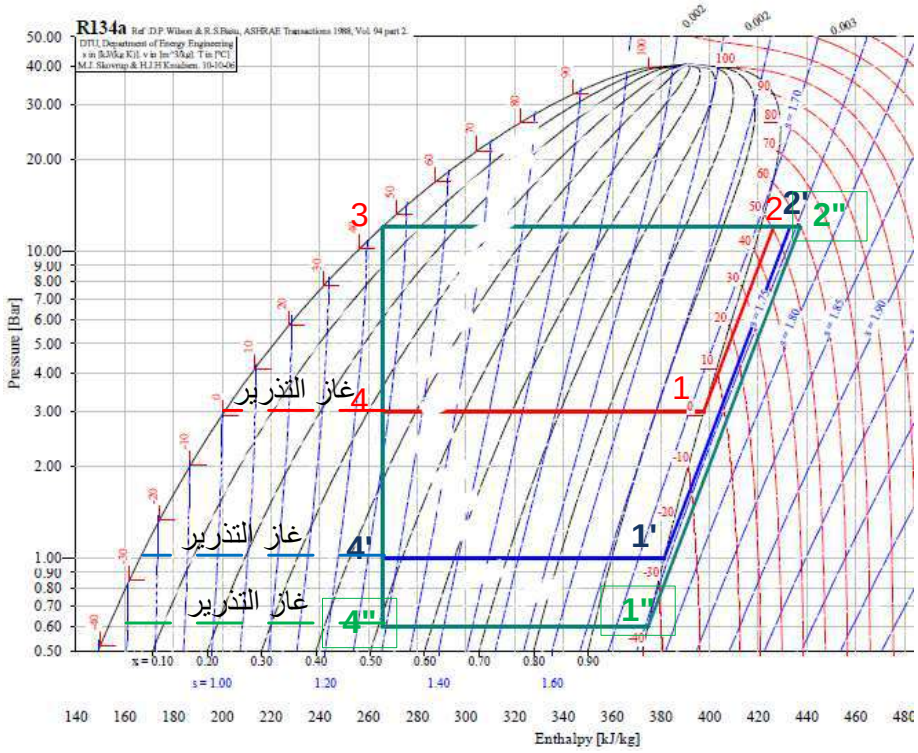
1-2 مقدمة Introduction

تعمل منظومات التثليج التقليدية بمرحلة انضغاط واحدة بين ضغطين، الأول هو ضغط منخفض (ضغط المبخر) والثاني هو ضغط عالي (ضغط المكثف)، ويتحسن أداء المنظومة كلما كان الفرق بين الضغطين قليلاً، أو بعبارة أخرى كلما كان الفرق بين درجتي حرارة المكثف والمبخر صغيراً، أي أن سعة التثليج والكفاءة للمنظومة تعتمد بشكل أساسي على الفرق بين درجتي حرارة التكثيف والتبخير (وكذلك الضغوط المناظرة لهما)، فكلما زاد الفرق قلت السعة والكفاءة وبالعكس.

في بعض التطبيقات الخاصة يكون الفرق بين درجتي حرارة التكثيف والتبخير كبيراً، إما بسبب الحاجة إلى رفع درجة حرارة التكثيف بحيث تكون أكبر من درجة حرارة المحيط، أو بسبب الحاجة إلى الحصول على درجات حرارة منخفضة في المبخر، أو الاثنان معاً. مثال ذلك مصانع تجميد المواد الغذائية التي تتطلب أن تصل درجة حرارة المبخر بحدود (−40°C) وفي المصانع الكيميائية ولتسييل الغازات قد تصل درجة الحرارة إلى (−150°C). كما إن متطلبات درجة حرارة التكثيف قد تكون عالية وخصوصاً عند استخدام منظومة التثليج كمضخة حرارية (Heat Pump)، فعند هذه الظروف يصبح استخدام المنظومات الاعتيادية (بمرحلة انضغاط واحدة) غير اقتصادي وغير عملي. ويبين الشكل (1-2) تأثير انخفاض درجة حرارة المبخر عند بقاء درجة حرارة المكثف ثابتة، حيث يلاحظ الزيادة بخسائر التمدد (Throttling) وزيادة كل من درجة حرارة تحميص البخار ودرجة حرارة البخار الخارج من الضاغط وكمية البخار الداخل للمبخر والحجم النوعي للبخار الداخل للضاغط. وكنتيجة لهذه الزيادات فإن التأثير التبريدي للمنظومة سينخفض مع ارتفاع شغل الانضغاط وينتج عن ذلك انخفاض معامل أداء (COP) منظومة الانضغاط بمرحلة واحدة. بشكل عام تكون درجة حرارة المبخر في المنظومات العاملة بموائع التثليج الهالوجينية والأمونيا، بحدود(−30°C) للمنظومات ذات الانضغاط بمرحلة واحدة، في حين أنها تساوي (−60°C) للمنظومات العاملة بمرحلتي انضغاط، وتكون درجة حرارة المبخر أقل من ذلك إذا كان الانضغاط بثلاث مراحل، في تطبيقات أخرى تكون الحاجة إلى توفير درجات حرارة مختلفة في المنظومة الواحدة، وهذا يتم عن طريق تزويد المنظومة بعدد من المبخرات العاملة كل يعمل عند درجة حرارة معينة، مثال ذلك مصانع الألبان التي تحتاج إلى درجة حرارة تقارب (2°C) لتبريد الحليب تبريداً أولياً ثم تنخفض درجة الحرارة إلى (−30°C) لعمل المثلجات، ففي مثل هذه الحالات يكون من المفيد استخدام منظومة واحدة متعددة المبخرات (Multi-Evaporators).

إن المنظومات المركبة تعمل بشكل عام باثنين أو أكثر من الضغوط المنخفضة، وتصنف إلى:

1. منظومات متعددة الانضغاط **Multi-Compression Systems**
2. منظومات متعددة المبخرات **Multi-Evaporator Systems**
3. منظومات تعاقبية **Cascade Systems**



شكل 2-1 مخطط الضغط – محتوى حراري (إنثالبي) لدورة تثليج تعمل بضغوط تبخير مختلفة

لاحظ زيادة شغل الضاغط (2-1) مع ازدياد الفرق بين ضغط التكثيف وضغط التبخير، ومع زيادة شغل الضاغط يقل معامل أداء الدورة.

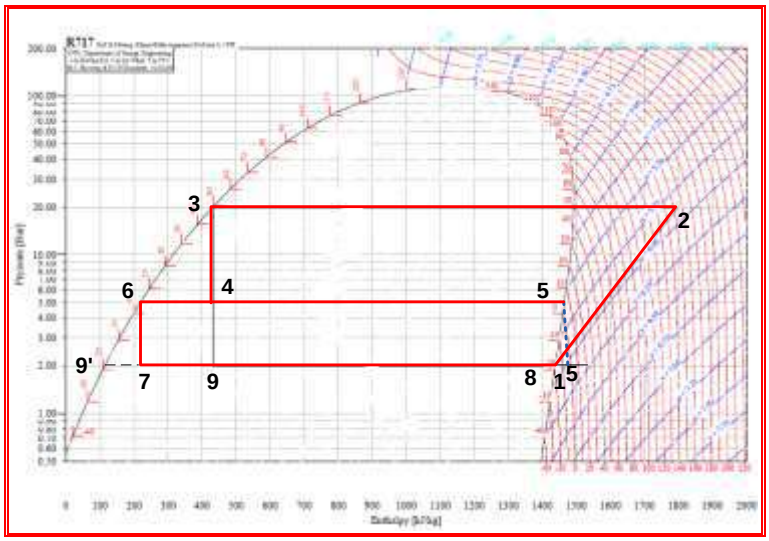
2-2 إزالة غاز التذرير(الوميض) Flash Gas Removal

من مساوئ عمل الضاغط عند نسبة انضغاط عالية (أي بين ضغط تكثيف مرتفع وضغط تبخير منخفض) هو زيادة كمية غاز التذرير (الوميض) (Flash Gas)، الناتج بعد عملية تمدد مائع التثليج، كما هو مبين في الشكل (2-1) ومن المعروف إن غاز التذرير يكون في حالة بخار مشبع وليس له تأثير ملحوظ في التأثير التبريدي للمبخر، بل بالعكس فهو يسبب زيادة خسائر الضغط إذا سمح له بالمرور خلال المبخر. ويمكن أن يتم تحسين معامل أداء المنظومة (COP) إذا تمت إزالة غاز التذرير عند تكونه وإعادته إلى الضاغط مرة أخرى ليعاد ضغطه ومن ثم دفعه إلى المكثف دون السماح له بالمرور خلال المبخر.

ومن إحدى الطرائق المستخدمة لسحب غاز التذرير هي استخدام خزان التذرير (Flash Tank)، المبين في الشكل (2-2) وخزان التذرير عبارة عن خزان ضغط (Pressure Vessel) يتم بداخله الفصل بين سائل وبخار مائع التثليج، ويتم الفصل عند ضغط متوسط (Intermediate Pressure)، ويتم فيه السماح لسائل مائع التثليج بالمرور خلال أداة التمدد، في حين أن بخار مائع التثليج يسحب من قبل الضاغط عبر أنبوب متصل بين خط السحب للضاغط وخزان التذرير.

ويمكن رسم الدورة المبينة في الشكل (2-2) على مخطط الضغط – المحتوى الحراري المبين في الشكل (2-3)، حيث تبدأ الدورة عند الرقم (1) والذي يمثل عملية سحب بخار مائع التثليج، ثم عملية انضغاط لبخار مائع التثليج ليرتفع ضغطه من النقطة (1) إلى النقطة (2)، وبعد ذلك عملية تكثيف في المكثف، ليخرج مائع التثليج بحالة سائل ساخن عند ضغط التكثيف عند النقطة (3)، بعد ذلك عملية تمدد أولية من الضغط العالي إلى الضغط المتوسط عندها نحصل على بخار رطب عند النقطة (4)، يدخل البخار الرطب خزان التذرير حيث يفصل بخار مائع التثليج والذي هو عند النقطة (5) ويرسل إلى خط سحب الضاغط عبر صمام مخفض للضغط، أما سائل مائع التثليج والذي هو عند النقطة (6) فأنه يتمدد عبر صمام تمدد آخر، حيث يتمدد إلى النقطة (7) وبعدها يذهب إلى المبخر ليتبخر ويخرج بحالة بخار رطب عند النقطة (8) وحال خروجه يختلط مع بخار التذرير عند النقطة (5) ومنها ينتج البخار عند النقطة (1) الذاهب إلى الضاغط. ويلاحظ انخفاض كمية غاز التذرير الداخل إلى المبخر من المسافة (9-9') عند عدم استخدام خزان تذرير إلى المسافة (7-9') ومنها نلاحظ زيادة التأثير التبريدي المبين في الخط (7-8) في حالة استخدام خزان تذرير مقارنة بالتأثير التبريدي الممثل بالخط (9-8) في حال عدم استخدام خزان تذرير.

شكل 2-2 خزان التذرير في دورة التثليج



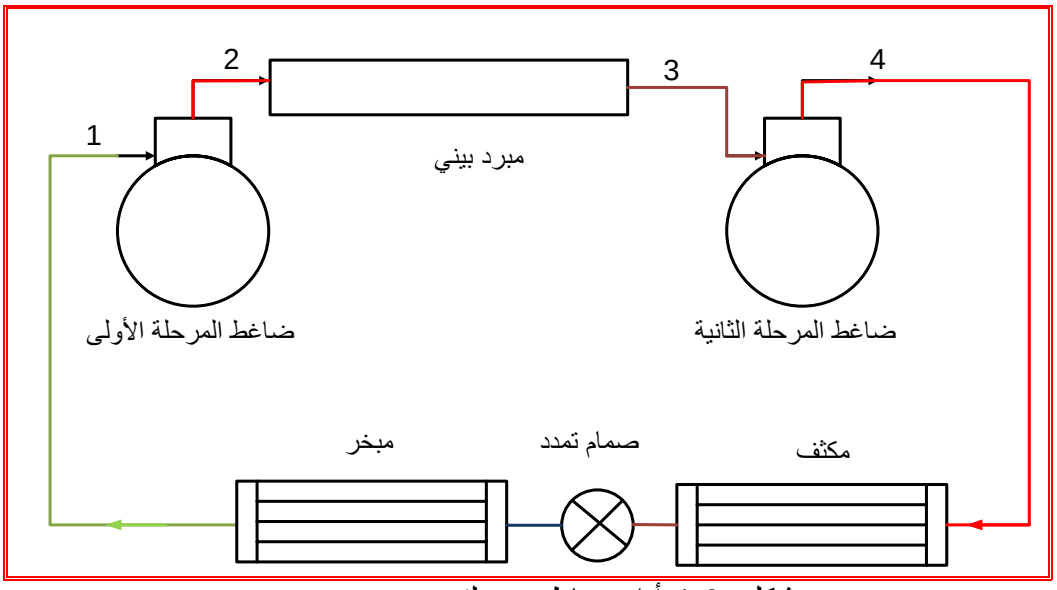
شكل 2-3 دورة التثليج على مخطط الضغط – المحتوى الحراري

3-2 التبريد البيني في منظومات الانضغاط المتعدد

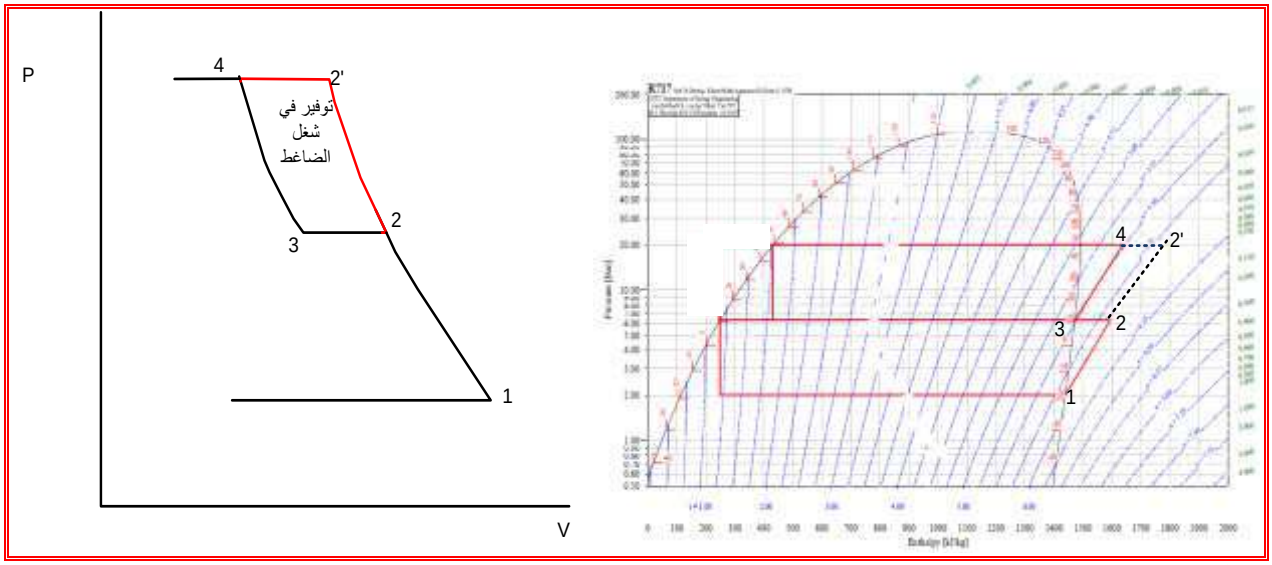
Inter Cooling in Multi-Stage Compression

التبريد البيني هو عبارة عن تبريد لبخار مائع التثليج بعد ضغطه أولياً من قبل ضاغط المرحلة الأولى، وبعد أن يبرد بخار مائع التثليج يُسحب من قبل ضاغط المرحلة الثانية، وكما هو مبين في الشكل (2-4 أ)، ويُعد المبدأ الأساسي لاستخدام التبريد البيني في منظومات الانضغاط متعددة المراحل، هو من أجل تقليل درجة حرارة بخار مائع التثليج وبالتالي تقليل حجمه النوعي، ثم تقليل شغل الانضغاط. ولتوضيح ذلك يمكن ملاحظة الشكل (2-4 ب) الذي يمثل عملية الانضغاط بمرحلتين مع وجود مبرد بيني، فلو تمت عملية الانضغاط بمرحلة واحدة ودون وجود مبرد بيني لأرتفع الضغط من النقطة (1) إلى النقطة (2) مباشرة، في حين أن عملية الانضغاط بمرحلتين مع مبرد بيني هي ثلاث عمليات متعاقبة هي (1←2) الانضغاط من ضغط المبخر إلى ضغط المبرد البيني، عملية التبريد البيني بثبات الضغط (2←3) وعملية الانضغاط الثانية من ضغط المبرد البيني إلى ضغط المكثف (3←4). إن مقدار الشغل النوعي الذي تم تقليله تمثله المساحة المظللة (2-3-4-2')، وكما هو مبين في الشكل (2-4 ب) على مخطط الضغط – الحجم لمائع التثليج المستخدم عندما تكون عمليات الانضغاط بالحالة المثالية وبدون انتقال للحرارة من الضاغط إلى الخارج، أي: بدون خسائر ولذا تكون عملية الانضغاط **بثبات الإنتروبي Isentropic Process**).

ومن ملاحظة الشكل (2-4 ب) نرى أن التبريد البيني بين عمليتي الانضغاط يمكن أن يقلل الشغل النسبي للضاغط بمقدار المساحة (2-3-4-2') فضلاً عن أنه يقلل درجة حرارة الغاز بعد عملية الانضغاط في المرحلة الثانية مما يقود إلى تحسين عملية تزييت الضاغط وبالنتيجة زيادة العمر التشغيلي للضاغط. والتبريد البيني يمكن الحصول عليه إما من خلال استخدام مبادل حراري أو خزان تذرير.



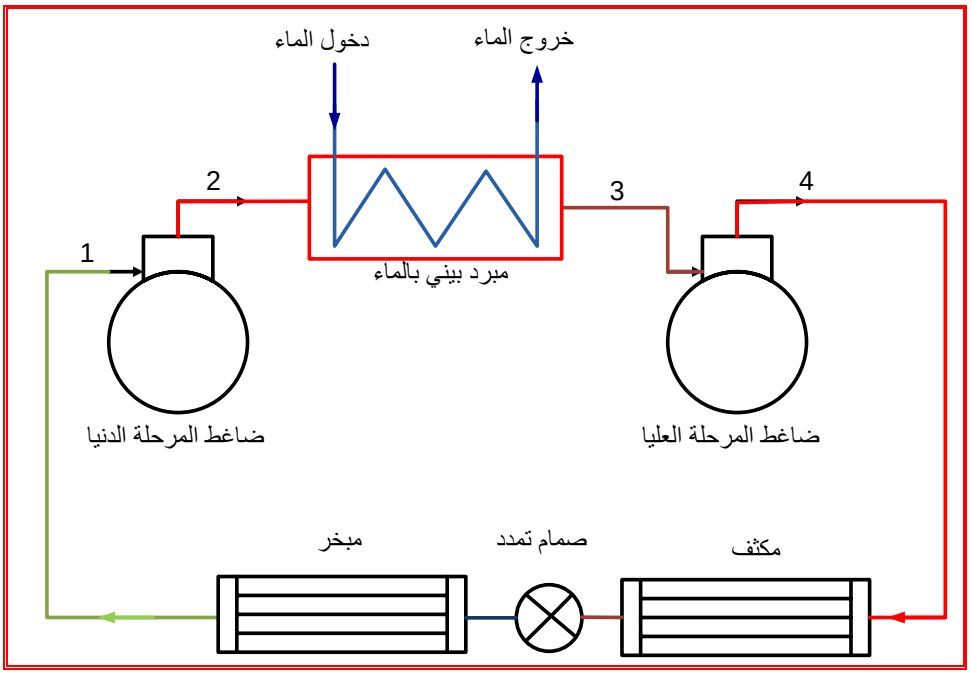
شكل 2-4 أ انضغاط بمرحلتين مع مبرد بيني



شكل 2-4 ب عملية انضغاط بمرحلتين مع مبرد بيني على مخططي الضغط – المحتوى الحراري والضغط – الحجم

2-3-1 التبريد البيني بمبادل حراري Inter-Cooling by Heat Exchanger

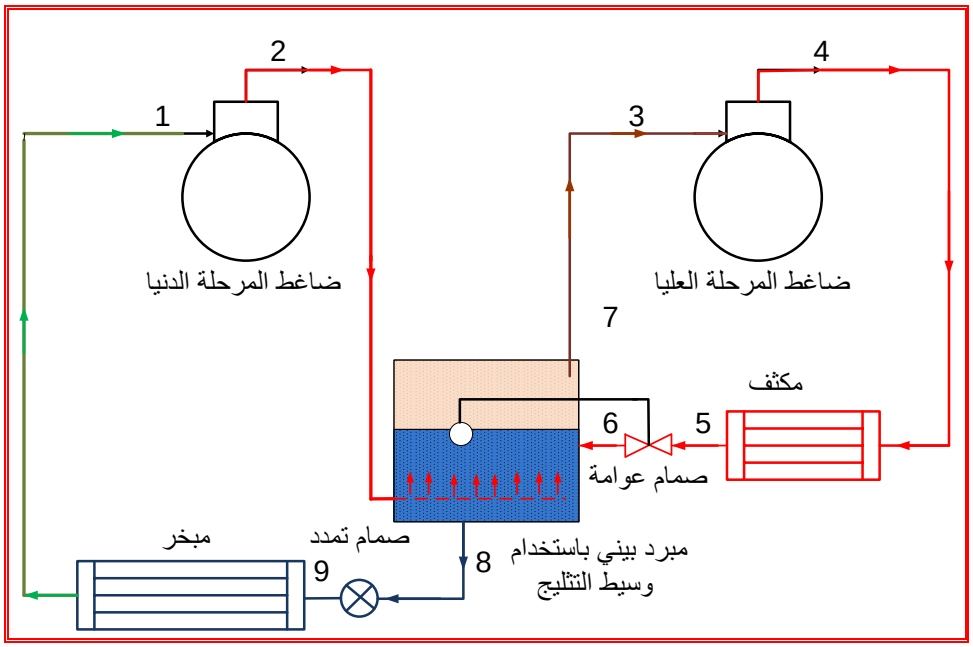
يستخدم الماء في بعض الأحيان لتبريد المبرد البيني ويبين الشكل (2-5) رسم تخطيطي للتبريد البيني باستخدام مبادل حراري يكون فيه الماء هو الوسيط الذي يسحب الحرارة من بخار مائع التثليج بعد المرحلة الأولى من الانضغاط. لكن هذا النوع من التبريد البيني محدود الاستخدام في منظومات التثليج بسبب عدم إمكانية الماء لإيصال البخار المحمص الخارج من ضاغط المرحلة الأولى إلى درجة حرارة تشبع البخار، وذلك بسبب محدودية درجة حرارة الماء المتوافر. ويستخدم التبريد البيني باستخدام الماء بشكل مألوف في ضواغط الهواء.



شكل 2-5 مبرد بيني باستخدام مبادل حراري

2-3-2 التبريد البيني بخزان التذرير Inter-Cooling by Flash Tank

يعمل خزان التذرير في بعض الأحيان عمل المبرد البيني، وكما هو مبين في الشكل (2-6)، وتتم عملية التبريد البيني عن طريق مرور بخار مائع التثليج الخارج من ضاغط المرحلة الدنيا عند النقطة (2)، خلال سائل مائع التثليج الموجود في خزان التذرير حيث يبخر قسماً من مائع التثليج مع انخفاض في درجة حرارته التي قد تصل إلى درجة حرارة التشبع المناظرة لضغط خزان التذرير. بعد ذلك يخرج البخار من خزان التذرير عند النقطة (3) وقد انخفضت درجة حرارته وازدادت كتلته بسبب تبخر جزءاً من سائل مائع التثليج في خزان التذرير، يقوم ضاغط المرحلة العليا بسحب بخار مائع التثليج وضغطه إلى الضغط العالي عند النقطة (4) وتكثيفه خلال المكثف ليصبح عند النقطة (5) ومنها يحصل التمدد الأولي في خزان التذرير وتكون حالة مائع التثليج عند النقطة (6) خليطاً من سائل وبخار مائع التثليج، ويتم سحب سائل مائع التثليج من أسفل الخزان عند النقطة (8) ويتمدد عبر صمام التمدد وبعد ذلك يدفع إلى المبخر ليقوم بفعل التثليج. وتستخدم هذه الدورات مع مائع التثليج الأمونيا لأن الطاقة المبذولة في الضاغط لضغط بخار مائع التثليج غالباً ما تقل عند استخدام خزان التذرير للتبريد البيني، في حين لا تتأثر بشكل كبير عند استخدام مائعي التثليج R-12 ، R-22.



شكل 2-6 مبرد بيني باستخدام سائل مائع التثليج

4-2 منظومات متعددة الانضغاط Multi-Compression Systems

إن اختيار الضغط الوسطي (ضغط التبريد البيني) يُعد أحد المهام التصميمية في منظومات الانضغاط متعدد المراحل. لضواغط الهواء يحسب ضغط التبريد البيني الأمثل (Optimum) من العلاقة الآتية:

$$P_i = \sqrt{P_L \times P_H}$$

إذ أن:

P_i	ضغط المبرد البيني	kPa
P_L	ضغط بخار مائع التثليج الأدنى في الدورة (ضغط المبخر)	kPa
P_H	ضغط بخار مائع التثليج الأعلى في الدورة (ضغط المكثف)	kPa

وتستخدم المعادلة التالية في الانضغاط متعدد المراحل في منظومات التثليج، وفيها تدخل درجتي حرارة المكثف والمبخر ضمن معادلة حساب الضغط الوسطي وكما يأتي:

$$P_i = \sqrt{P_L \times P_H \times \frac{T_c}{T_e}}$$

إذ أن:

Tc	درجة حرارة التكثيف	K
T_e	درجة حرارة التبخير	K

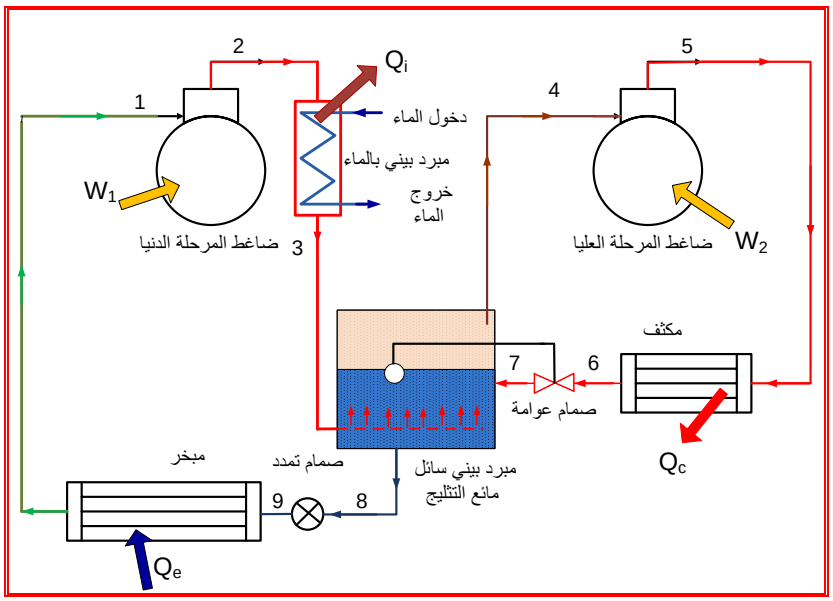
ويمكن ملاحظة العديد من تطبيقات وأنواع المبردات البينية ومنها:

1- منظومات متعددة المراحل مع إزالة غاز التذرير وتبريد بيني.
2- منظومات متعددة المراحل مع خزان تذرير لإزالة غاز التذرير.
3- منظومات متعددة المراحل مع خزان تذرير للتبريد البيني فقط.

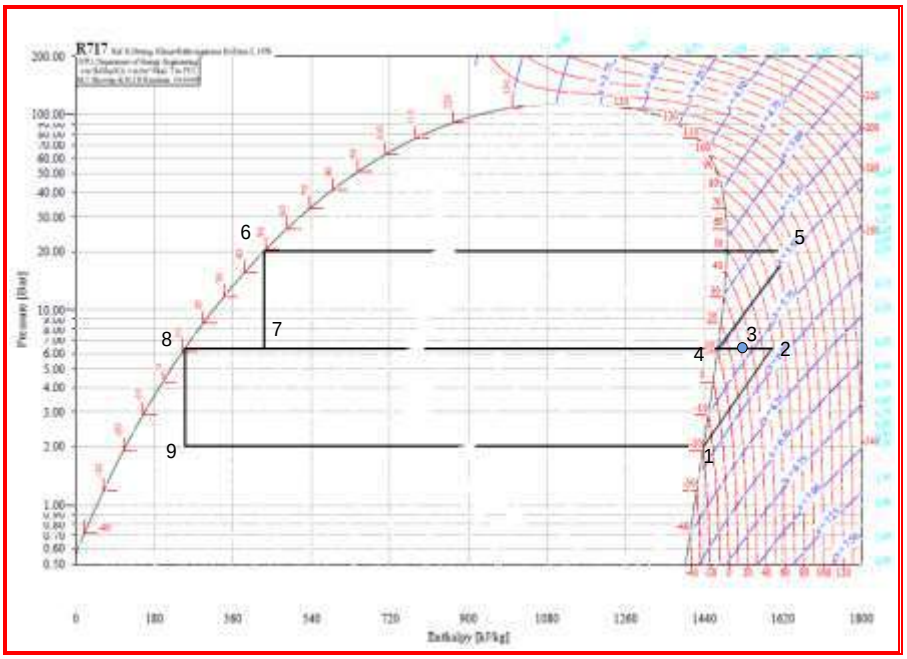
1-4-2 منظومات متعددة المراحل مع إزالة غاز التذرير وتبريد بيني

يستخدم المبرد البيني المبرد بالماء مع التبريد البيني بخزان التذرير لزيادة كفاءة تبريد بخار مائع التثليج بعد الانضغاط الأولي، وكما مبين في الشكل (2-7)، ففي المرحلة الأولى للتبريد يستخدم الماء لخفض درجة حرارة بخار مائع التثليج من النقطة (2) إلى النقطة (3)، وبعد ذلك يمرر البخار خلال سائل مائع التثليج في الخزان، ويخرج بخار مائع التثليج في حالة التشبع عند النقطة (4).

لدراسة أداء المنظومة، يمكن الرجوع إلى أساسيات علم الديناميك الحراري وتطبيق قانوني حفظ الكتلة والطاقة على كل جزء من أجزاء المنظومة، وعلى فرض إن خزان التذرير معزولاً عزلاً حرارياً تاماً مع إهمال التغيرات في طاقتي الوضع والحركة لمائع التثليج عند مروره في كل جزء من المنظومة. ومن أجل تحليل أداء المنظومة يمكن الرجوع إلى مخطط ضغط – محتوى حراري للمنظومة والمبين بالشكل (2-8) والذي تظهر عليه خواص مائع التثليج والعمليات التي يمر بها خلال أجزاء المنظومة.



شكل 2-7 مرحلتا انضغاط مع إزالة غاز التذرير باستخدام خزان التذرير ومبادل حراري



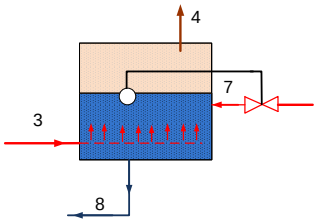
شكل 2-8 مخطط ضغط – محتوى حراري للمنظومة المبينة بالشكل (2-7)

بالإمكان الحصول على العلاقات التالية، من خلال تطبيق معادلة حفظ الكتلة والطاقة على أجزاء المنظومة وكما يأتي:

1- **خزان التذرير** Flash Tank (Chamber): عند تطبيق قانون حفظ الكتلة على خزان التذرير والذي ينص على أن الكتل الداخلة إلى النظام يجب أن تساوي الكتل الخارجة منه نستنتج المعادلة (2-1)، إما عند تطبيق قانون حفظ الطاقة الذي ينص على أن مجموع الطاقات الداخلة إلى النظام تساوي مجموع الطاقات الخارجة منه، نستنتج المعادلة (2-2) وكما يأتي:

$$m_7 + m_3 = m_8 + m_4 \qquad (2\text{-}1)$$

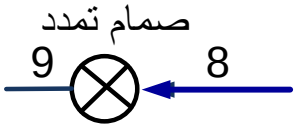
$$m_7 h_7 + m_3 h_3 = m_8 h_8 + m_4 h_4 \qquad (2\text{-}2)$$



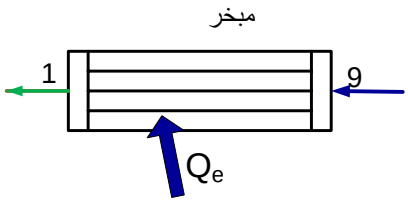
2- **صمام التمدد** Expansion Valve : كما تعلمنا من العلوم الصناعية للصف الأول إن عملية التمدد هي عملية خنق وفيها يتساوى المحتوى الحراري للمائع قبل الدخول مع المحتوى الحراري للمائع بعد الخروج مع تساوي كل من الكتلة الداخلة والكتلة الخارجة.

$$m_8 = m_9 \qquad (2\text{-}3)$$

$$h_9 = h_9 \qquad (2\text{-}4)$$



3- **المبخر** Evaporator : يتبخر سائل مائع التثليج في المبخر ويتحول إلى بخار، وحسب قانون حفظ الكتلة فإن الكتل الداخلة تساوي الكتل الخارجة، ومن قانون حفظ الطاقة نستنتج أن الطاقة الداخلة إلى المبخر مضافاً إليها الطاقة الحرارية التي سحبها المبخر تساوي الطاقة الخارجة من المبخر وكما يأتي:

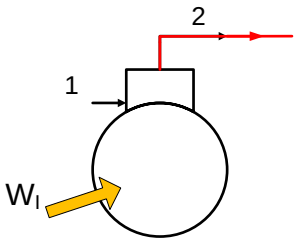


$$m_9 = m_1 = m_I \qquad (2\text{-}5)$$

$$Q_e + m_9 h_9 = m_1 h_1 \qquad (2\text{-}6\ a)$$

$$Q_e = m_I (h_1 - h_9) \qquad (2\text{-}6\ b)$$

4- **ضاغط المرحلة الدنيا** Compressor I : في ضاغط المرحلة الدنيا يستلم الضاغط بخار مائع التثليج عند النقطة (1) ويضغط عن طريق إضافة شغل إلى الضاغط، وطاقة بخار مائع التثليج الخارج تساوي مجموع الطاقة التي بذلت على الضاغط لإنجاز شغل الانضغاط مضافاً إليها طاقة بخار مائع التثليج قبل الانضغاط وكما يلي:



$$m_9 = m_1 = m_I \qquad (2\text{-}7)$$

$$W_I + m_1 h_1 = m_2 h_2 \qquad (2\text{-}8\ a)$$

$$W_I = m_I (h_2 - h_1) \qquad (2\text{-}8\ b)$$

إذ أن:

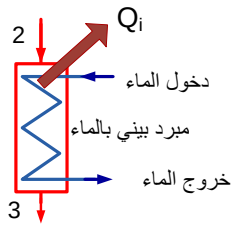
m_I	كتلة مائع التثليج المضغوطة من قبل ضاغط المرحلة الدنيا	kg/s
W_I	الطاقة المستهلكة في الضاغط الأول	kW

5- **المبرد البيني بالماء** Water Intercooler (Heat Exchanger): يستخدم المبرد البيني بالماء كما ذكرنا سابقاً لتبريد بخار مائع التثليج الخارج من ضاغط المرحلة الدنيا، حيث يتم إمرار ماء بارد حول الأنبوب الذي يحمل بخار مائع التثليج، حيث يسحب الماء جزءاً من الحرارة من بخار مائع التثليج، وعند تطبيق قانوني حفظ الكتلة والطاقة نحصل على ما يأتي:

$$m_3 = m_2 = m_I \quad (2\text{-}9)$$

$$m_2h_2 = m_3h_3 + Q_i \quad (2\text{-}10\ a)$$

$$Q_i = m_I\,(h_2 - h_3) \quad (2\text{-}10\ b)$$



إذ أن:

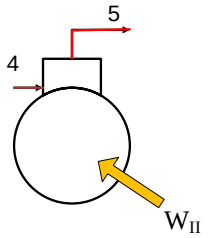
Q_i	الحرارة المنتقلة من مائع التثليج إلى ماء التبريد في المبادل الحراري	kW

6- **ضاغط المرحلة العليا** Compressor –II : يقوم ضاغط المرحلة العليا بضغط بخار مائع التثليج الخارج من المبرد البيني ورفع ضغطه إلى ضغط المكثف وبتطبيق معادلتي حفظ الكتلة والطاقة نحصل على ما يأتي:

$$m_4 = m_5 = m_{II} \quad (2\text{-}11)$$

$$W_{II} + m_4h_4 = m_5h_5 \quad (2\text{-}12\ a)$$

$$W_{II} = m_{II}\,(h_5 - h_4) \quad (2\text{-}12\ b)$$



إذ أن:

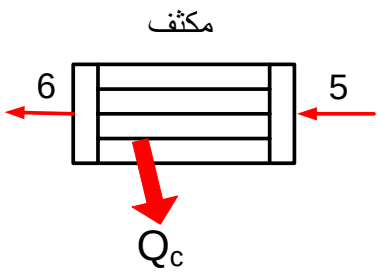
m_{II}	معدل التدفق الكتلي لمائع التثليج خلال ضاغط المرحلة العليا	kg/s
W_{II}	شغل الانضغاط أو الطاقة المصروفة لضاغط المرحلة العليا	kW

7- **المكثف** Condenser: من المعروف أن المكثف يقوم بطرح الحرارة من مائع التثليج ليحوله إلى الحالة السائلة أي أن الموازنة الحرارية للمكثف تتم عن طريق مساواة الطاقة الداخلة مع مجموع الحرارة المطرودة من المكثف وطاقة سائل مائع التثليج الخارج من المكثف وكما يأتي:

$$m_5 = m_6 = m_{II} \quad (2\text{-}13)$$

$$m_5h_5 = m_6h_6 + Q_c \quad (2\text{-}14\ a)$$

$$Q_c = m_{II}\,(h_5 - h_6) \quad (2\text{-}14\ b)$$



إذ أن:

Q_c	الحرارة المطروحة من المكثف	kW

8- صمام ذو العوامة Float Valve : إن الإجراء الذي يتم خلال صمام العوامة هو مشابه تماماً لما يحصل في صمام التمدد لذا هي عملية خنق وفيها يتساوى المحتوى الحراري للمائع قبل الدخول مع المحتوى الحراري للمائع بعد الخروج مع تساوي كل من الكتلة الداخلة والكتلة الخارجة

$$\mathbf{m_6 = m_7 = m_{II}} \qquad (2\text{-}15)$$

$$\mathbf{h_6 = h_7} \qquad (2\text{-}16)$$

من خلال المعادلات المذكورة نستطيع أن نحسب كتلة مائع التثليج في مرحلة الانضغاط الدنيا عن طريق (2-6 b) حيث أن سعة المنظومة تكون عادة معروفة ومنها نستطيع حساب الكتلة كما يأتي:

$$\mathbf{Q_e = m_I\,(h_1 - h_9)} \qquad (2\text{-}6\ b)$$

$$\boldsymbol{m_I = \frac{Q_e}{h_1 - h_9}} \qquad (2\text{-}6\ c)$$

إما كتلة بخار مائع التثليج التي تضغط في ضاغط المرحلة العليا فتحسب من المعادلة:

$$\boldsymbol{m_{II} = \frac{h_3 - h_8}{h_4 - h_7}} \qquad (2\text{-}17)$$

ومن هذه العلاقة يمكن ملاحظة إمكانية تقليل كتلة مائع التثليج المارة خلال مرحلة الانضغاط العليا (m_{II}) من خلال تقليل المحتوى الحراري لبخار المائع الداخل لخزان الوميض بعد خروجه من المبادل الحراري.

إما مقدار البخار الإضافي المتولد نتيجة عملية إزالة تحميص البخار في خزان التذرير:

$$\boldsymbol{m_{gen} = m_I \times \frac{h_3 - h_4}{h_4 - h_8}} \qquad (2\text{-}18)$$

m_{gen}	كتلة بخار مائع التثليج المتكون في أثناء عملية التذرير	kg/s

معامل أداء المنظومة COP فيحسب من المعادلة الآتية:

$$COP = \frac{Q_e}{W_I + W_{II}} = \frac{m_I(h_1 - h_9)}{m_I(h_2 - h_1) + m_{II}(h_5 - h_4)} \qquad (2\text{-}19)$$

إذ أن:

COP	معامل أداء المنظومة	
Q_e	سعة المنظومة	kW
W_I	الطاقة المستهلكة في ضاغط المرحلة الدنيا	kW
W_{II}	الطاقة المستهلكة في ضاغط المرحلة العليا	kW
m_I	كتلة مائع التثليج المجهز من قبل ضاغط المرحلة الدنيا	kg/s
m_{II}	كتلة مائع التثليج المجهزة من قبل ضاغط المرحلة العليا	kg/s

من إيجابيات هذه الدورة:

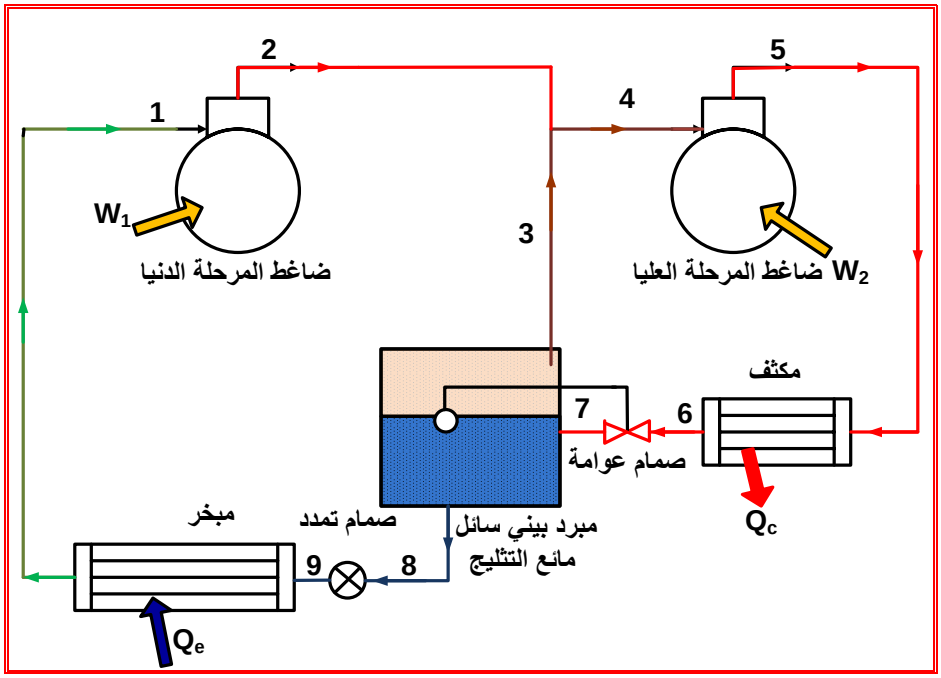
1- من ملاحظة مخطط الدورة على مخطط الضغط – المحتوى الحراري المبينة في الشكل (2-8) هو أن نسبة الجفاف (Dryness Fraction) لمائع التثليج الداخل للمبخر قليل، وهذا يعني زيادة مائع التثليج في الحالة السائلة وتقليله بالحالة الغازية، وهذا يؤدي إلى زيادة التأثير التبريدي، فضلاً عن انخفاض خسائر الضغط نتيجة لقلة بخار مائع التثليج الداخل إلى المبخر إضافة إلى تحسن انتقال الحرارة في المبخر.

2- زيادة الكفاءة الحجمية للضواغط بسبب الانخفاض في حجم الغاز النوعي فضلاً عن انخفاض نسبة الانضغاط.

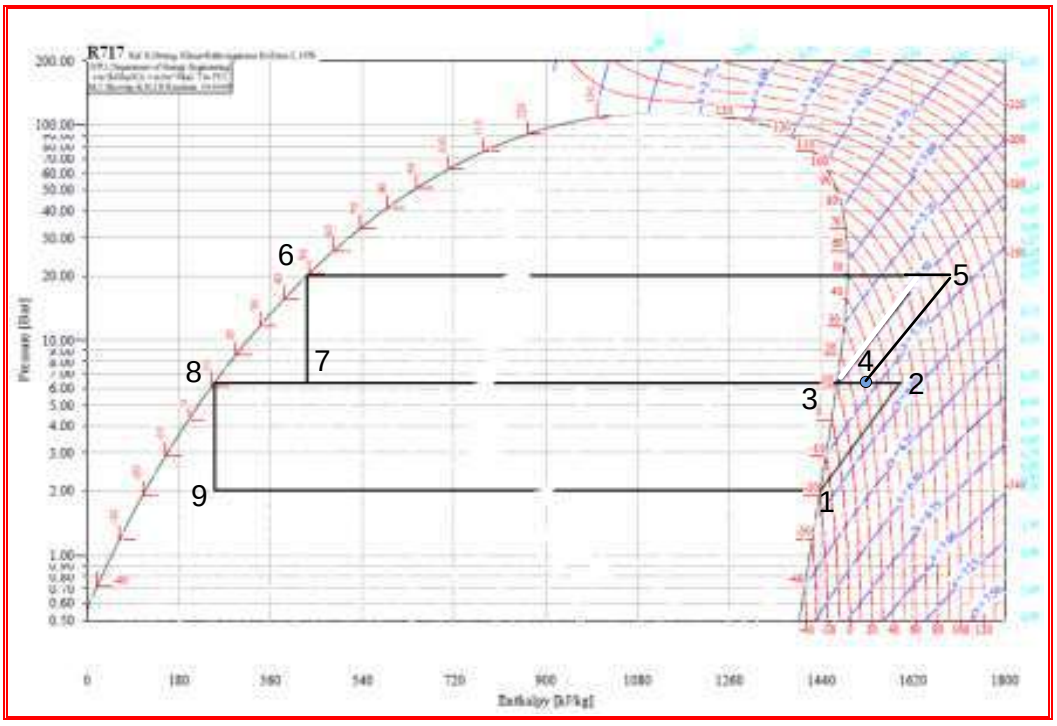
3- انخفاض درجة حرارة الغاز الخارج من مرحلة الانضغاط العليا وبالتالي تقليل الحمل على المكثف.

2-4-2 منظومات متعددة المراحل مع خزان لإزالة غاز التذرير

تختلف هذه المنظومة عن سابقتها بعدم إمرار بخار مائع التثليج الخارج من ضاغط المرحلة الدنيا خلال خزان التذرير، وإنما يكتفي بخلط بخار مائع التثليج الخارج من ضاغط المرحلة الدنيا عند النقطة (2) مع بخار مائع التثليج الخارج من خزان التذرير عند النقطة (3) ويسحب الخليط الناتج عند النقطة (4) والذي يكون محمصاً قليلاً ويحتوي على درجة تحميص معينة إلى خط سحب ضاغط المرحلة العليا. وبعد انضغاط خليط بخار مائع التثليج يدفع إلى المكثف ليتكثف عند النقطة (6) وبعدها يتمدد تمدداً أولياً إلى النقطة (7)، حيث يتكون خليط من سائل وبخار مائع التثليج، وفي خزان التذرير يتم فصل البخار ليختلط مع بخار مائع التثليج الخارج من ضاغط المرحلة الدنيا كما سبق ذكره، في حين أن سائل مائع التثليج عند النقطة (8) يتمدد خلال صمام التمدد ويذهب ناتج التمدد إلى المبخر ليتبخر هناك جراء سحبه الحرارة من الحيز المراد تثليجه، ويسحب البخار الناتج عند النقطة (1) من قبل ضاغط المرحلة الدنيا، وكما هو مبين في الشكل (2-9)، في حين يوضح الشكل (2-10) الدورة على مخطط الضغط – المحتوى الحراري.



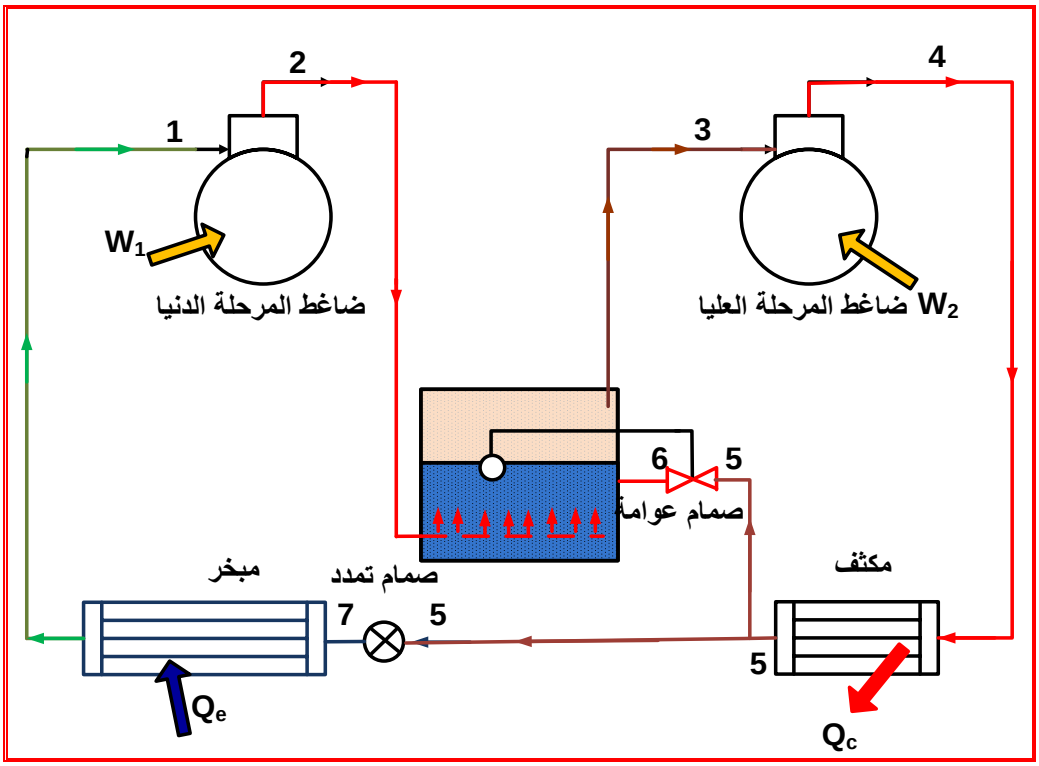
شكل 2-9 الانضغاط بمرحلتين مع خزان لإزالة غاز التذرير



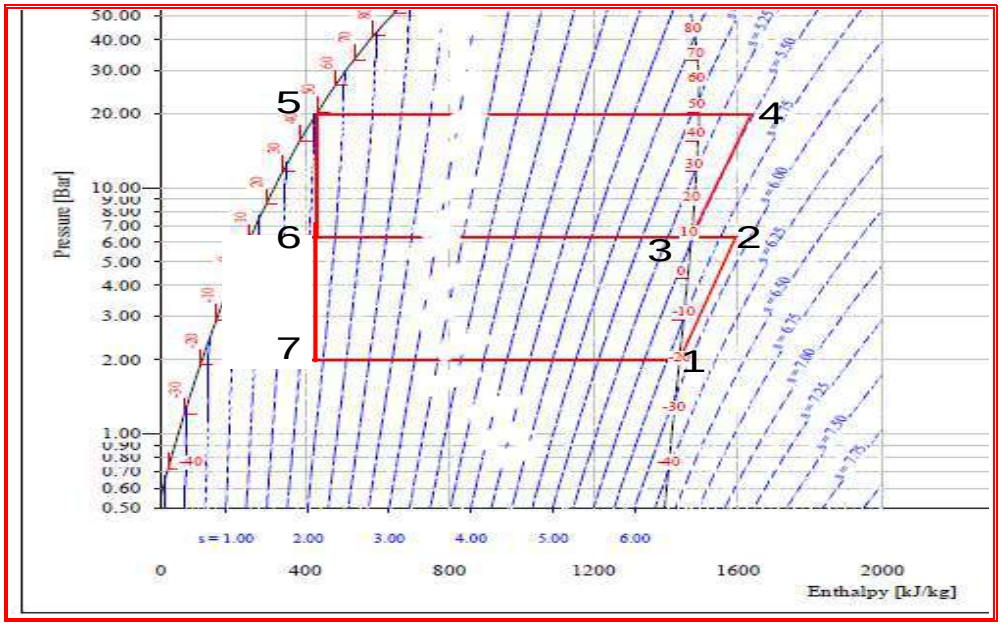
شكل 2-10 مخطط ضغط – محتوى حراري لمنظومة انضغاط بمرحلتين تستخدم خزان التذرير لإزالة غاز التذرير

2-4-3 منظومات متعددة المراحل مع خزان تذرير للتبريد البيني فقط

يستخدم خزان التذرير في بعض الأحيان في تبريد بخار مائع التثليج بعد انضغاطه في مرحلة الانضغاط الدنيا، ولا يتم في هذه الحالة إزالة غاز التذرير بعد التمدد الأولي، ويُعد هذا النوع من التبريد البيني بسيطاً ويستخدم عندما لا تكون نسبة الانضغاط عالية. ويبين الشكل (2-11) أحد أنواع المنظومات متعددة المراحل مع خزان تذرير للتبريد البيني فقط، ويلاحظ أن بخار مائع التثليج المجهز من قبل ضاغط المرحلة الدنيا عند النقطة (2) يمر خلال سائل مائع التثليج في خزان التذرير وإزالة حرارة التحميص منه ليخرج عند النقطة (3)، في حين أن الشكل (2-12) يبين الدورة على مخطط الضغط – المحتوى الحراري. وتجدر الإشارة هنا إلى عدم تساوي كتلة بخار مائع التثليج المجهز من قبل ضاغط المرحلة الدنيا مع تلك التي تجهز من قبل ضاغط المرحلة العليا، وذلك بسبب تبخر جزء من سائل مائع التثليج في أثناء مرور بخار مائع التثليج خلال خزان التذرير، وعلى هذا الأساس يدفع ضاغط المرحلة العليا كتلة مائع تثليج أكبر من تلك التي يجهزها ضاغط المرحلة الدنيا.



شكل 2-11 مخطط منظومة بمرحلتي انضغاط مع خزان التذرير كمبرد بيني فقط



شكل 2-12 مخطط ضغط – إنثالبي لمنظومة بمرحلتي انضغاط مع خزان التذرير كمبرد بيني فقط

5-2 منظومات متعددة المبخرات Multi-Evaporator Systems

في بعض التطبيقات تكون الحاجة إلى توفير درجات حرارة مختلفة في منظومة تبريد واحدة، فمثلاً في مخازن التبريد والتثليج يتطلب الأمر تبريد المواد الغذائية تبريداً أولياً ثم بعد ذلك يتم إجراء عمليات صناعية معينة عليها عند درجات حرارة منخفضة، وحيث أن استخدام عدة منظومات تثليج لتحقيق هذا الغرض يُعد مكلفاً من ناحية الكلفة الابتدائية وكلفتي النصب والصيانة، لذا تم استحداث منظومات تثليج تعمل بضاغط واحد أو عدة ضواغط وتكون مجهزة بعدد من المبخرات كل يعمل عند درجة حرارة مختلفة أو تعمل جميعها عند درجة الحرارة نفسها ولكن ذات سعات مختلفة. ويمكن تصنيف منظومات التثليج متعددة المبخرات إلى ما يأتي:

1- منظومات متعددة المبخرات وضاغط واحد.

2- منظومات متعددة المبخرات ومتعددة الضواغط.

وفيما يلي توضيح لمكونات المنظومات متعددة المبخرات، من خلال توضيح منظومة بمبخرين وضاغط واحد، وأخرى بمبخرين وضاغطين.

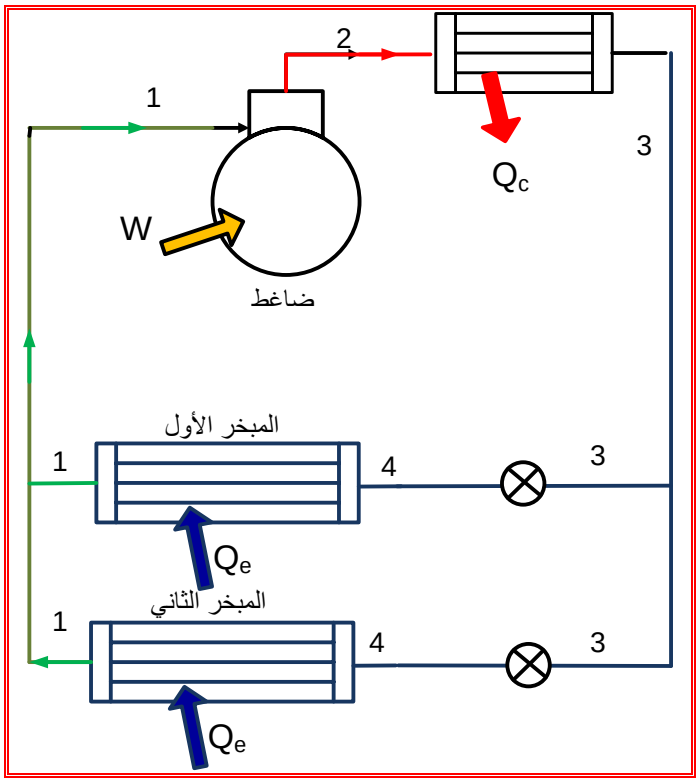
1-5-2 منظومة بمبخرين عند درجة حرارة واحدة وضاغط واحد

Two Evaporators at Same Temperature and One Compressor

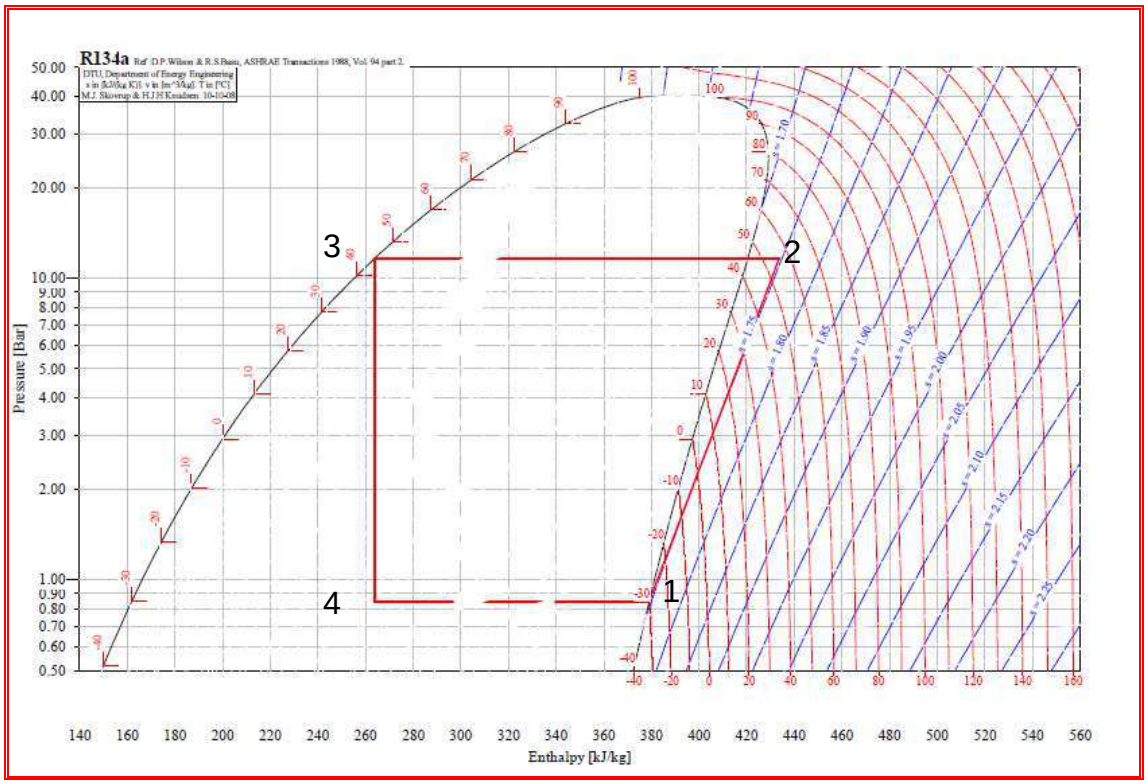
تتميز هذه المنظومة بتساوي درجة حرارة المبخرات العاملة في الدورة، ويزود كل مبخر بصمام تمدد ذي سعة ثابتة مما يؤدي إلى تساوي ضغط المبخرات العاملة في الدورة الواحدة، وقد تتساوى سعة المبخرات أو تختلف سعتها، فمثلاً قد يكون المبخر الأول عند درجة حرارة مقدارها $(-30°C)$ وبسعة 10 TR، والمبخر الثاني درجة الحرارة نفسها ولكن بسعة مقدارها 30 TR وهكذا. الشكل (2-13) يبين منظومة تثليج بمبخرين يعملان عند درجة الحرارة نفسها في حين أن الشكل (2-14) يبين الدورة على مخطط الضغط – المحتوى الحراري. ويمكن حساب معامل أداء الدورة من المعادلة الآتية:

$$COP = \frac{Q_{eI}+Q_{eII}}{W_c} \qquad (2\text{-}20)$$

تُعد هذه المنظومات من المنظومات الاقتصادية وقليلة المشاكل، فضلاً عن إمكانيتها لخدمة مبخرات عند درجة الحرارة نفسها وبمواقع مختلفة وباستخدام ضاغط واحد.



شكل 2-13 منظومة تثليج متعددة المبخرات تعمل عند درجة حرارة واحدة



شكل 2-14 دورة تثليج منظومة متعددة المبخرات تعمل عند درجة الحرارة نفسها على مخطط الضغط - المحتوى الحراري

2-5-2 منظومة بمبخرين عند درجات حرارة مختلفة وضاغط واحد

Two Evaporators at Different Temperatures and One Compressor

نحتاج في بعض التطبيقات إلى مبخرات تعمل عند درجات حرارة مختلفة في منظومة تثليج واحدة، ويمكن تحقيق ذلك عن طريق تزويد المنظومة بعدد من المبخرات ويزود كل مبخر بصمام تمدد خاص يمكنه التحكم بضغط المبخر وبالتالي بدرجة حرارة المبخر، وللسيطرة على عمل المنظومة يجب تزويد نهاية المبخر ذي درجة الحرارة العالية بمنظم لضغط السحب وذلك لمنع تداور بخار مائع التثليج ما بين المبخرات العاملة، فضلاً عن أن المبخر الأكثر درجة حرارة يكون عند ضغط أكبر من ضغط المبخر الآخر. لذا يجب تقليل ضغط البخار بعد خروجه من هذا المبخر وقبل سحبه من قبل الضاغط، ويبين الشكل (2-15) مخطط الدورة، في حين يبين الشكل (2-16) الدورة على مخطط الضغط - المحتوى الحراري.

في هذه المنظومة يلاحظ ارتفاع قيمة التأثير التبريدي للمبخر II، لكن هذا الارتفاع قد لا يحسن معامل الأداء للمنظومة بشكل ملحوظ، لأن البخار المار بالمبخر II سيتم خفض ضغطه باستخدام صمام تنظيم الضغط PRV (Pressure Regulator Valve) .

يحسب معامل أداء هذه المنظومة من المعادلة التالية:

$$COP = \frac{Q_{eI}+Q_{eII}}{W_c} = \frac{m_I \times (h_7 - h_5) + m_{II} \times (h_6 - h_4)}{(m_I + m_{II}) \times (h_2 - h_1)} \qquad (2\text{-}21)$$

إذ أن:

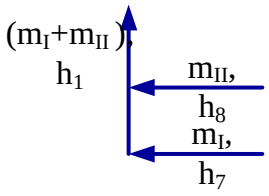
COP		معامل أداء الدورة	
Wc		القدرة المبذولة على الضاغط	kW
Qe_I		سعة المبخر الأول	kW
Qe_{II}		سعة المبخر الثاني	kW
m_I		كتلة مائع التثليج المارة في المبخر الأول	kg/s
m_{II}		كتلة مائع التثليج المارة بالمبخر الثاني	kg/s

ويمكن حساب كتل موائع التثليج المارة في كل مبخر من المعادلتين الآتيتين:

$$m_I = \frac{Q_{eI}}{(h_7 - h_5)} \qquad (2\text{-}22)$$

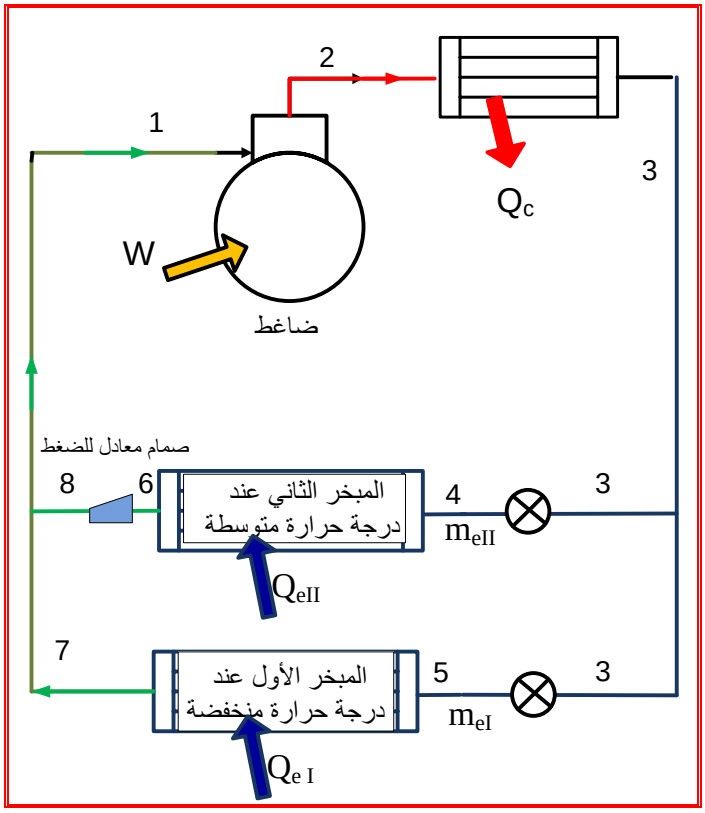
$$m_{II} = \frac{Q_{eII}}{(h_6 - h_4)} \qquad (2\text{-}23)$$

ويمكن حساب مواصفات بخار مائع التثليج عند خط سحب الضاغط، النقطة (1) بعد تطبيق قانون حفظ الطاقة على النقطة (1) وكما يأتي:

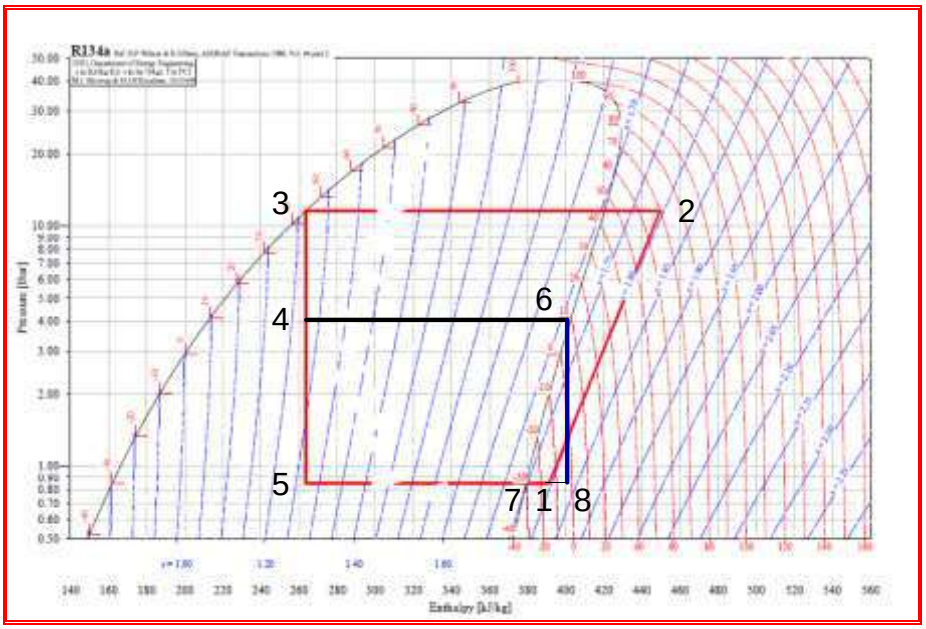


$$(\boldsymbol{m_I + m_{II}}) \times \boldsymbol{h_1} = \boldsymbol{m_I} \times \boldsymbol{h_7} + \boldsymbol{m_{II}} \times \boldsymbol{h_8}$$

$$\boldsymbol{h_1} = \frac{\boldsymbol{m_I \times h_7 + m_{II} \times h_8}}{\boldsymbol{m_I + m_{II}}} \qquad (2\text{-}24)$$



شكل 2-15 منظومة تثليج متعددة المبخرات تعمل المبخرات عند درجات حرارة مختلفة، وضاغط واحد



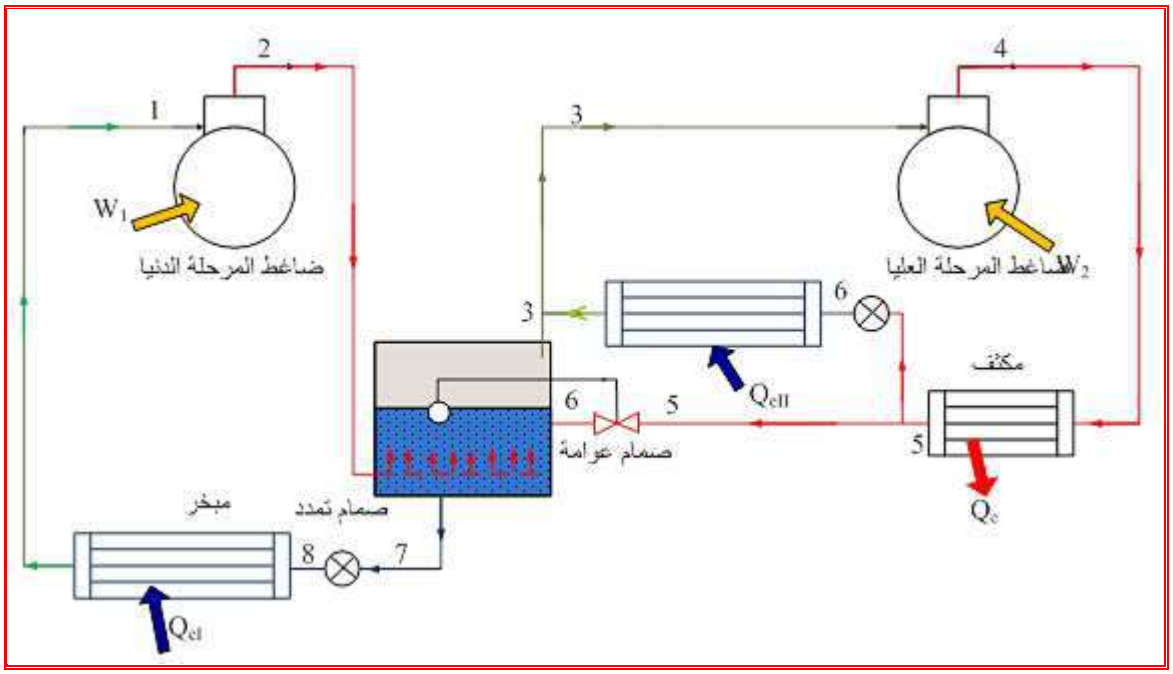
شكل 2-16 دورة منظومة تثليج متعددة المبخرات تعمل المبخرات عند درجات حرارة مختلفة، وضاغط واحد على مخطط الضغط - المحتوى الحراري

2-5-3 منظومات بمبخرين وضاغطين

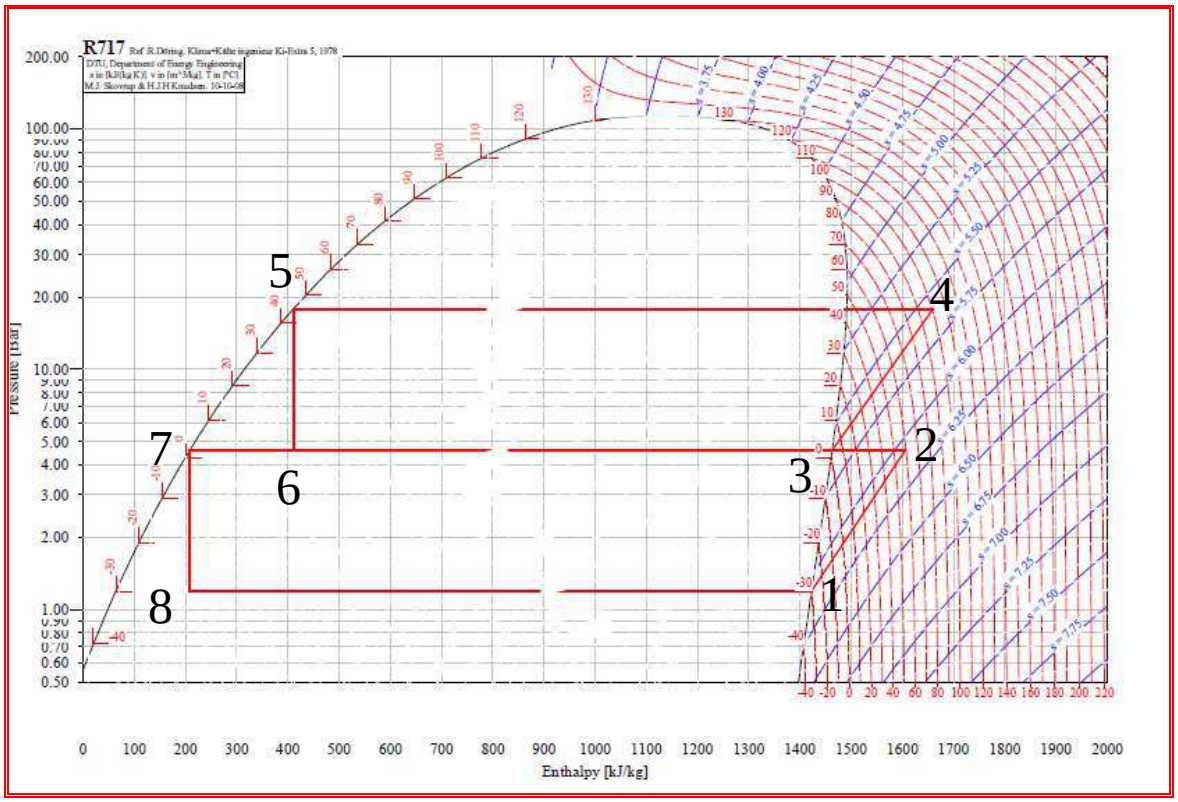
Two Evaporators and Two Compressors

منظومات التثليج الانضغاطية ذات المبخرين بدرجات حرارة مختلفة ولأحمال حرارية مختلفة، وعاملة بمرحلتي انضغاط شائعة الاستخدام في مجال التثليج الصناعي، كما إنها تكون ذات كفاءة جيدة، ومثال ذلك في معمل تصنيع المنتجات الغذائية، عندما يكون أحد المبخرات بدرجة حرارة (−40°C) لتجميد السريع للمنتجات والمبخر الآخر بدرجة حرارة (−25°C) لخزن المنتجات الغذائية المجمدة.

ويبين الشكل (2-17) والشكل (2-18) رسم تخطيطي ومخطط ضغط – محتوى حراري لمنظومة تثليج انضغاطية بمبخرين وضاغطين مع خزان تذرير لإزالة غاز التذرير والتبريد البيني، كما يُلاحظ من الرسم التخطيطي للمنظومة إن ضغط المبخر II، هو ضغط خزان التذرير، كما إن التأثير التبريدي للمبخر I سيتحسن بسبب تسلمه سائلاً مشبعاً من أسفل خزان التذرير. كما أن الطاقة المصروفة في مرحلتي الانضغاط ستنخفض وخصوصاً عندما يكون مائع التثليج هو الأمونيا.



شكل 2-17 دورة تثليج بمبخرين يعملان عند درجات حرارة مختلفة وضاغطين



شكل 2-18 دورة تثليج بمبخرين يعملان عند درجات حرارة مختلفة وضاغطين على مخطط الضغط – المحتوى الحراري

ويمكن حساب معامل أداء المنظومة من القانون الآتي:

$$COP = \frac{Q_{eI}+Q_{eII}}{W_{cI}+W_{cII}} = \frac{m_I\times(h_1-h_8)+m_{II}\times(h_3-h_6)}{m_I\times(h_2-h_1)+m_{II}\times(h_4-h_3)} \qquad (2\text{-}25)$$

ويمكن حساب معدل تدفق مائع التثليج المار في كل ضاغط من العلاقتين أدناه:

$$m_I = \frac{Q_{eI}}{(h_1-h_8)} \qquad (2\text{-}26)$$

$$m_{II} = \frac{Q_{eII}}{(h_3-h_6)} \qquad (2\text{-}27)$$

إذ أن:

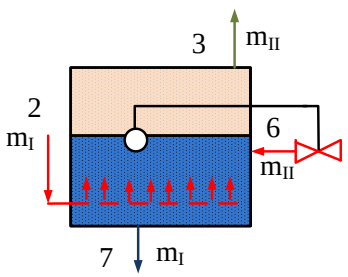
COP	معامل أداء الدورة	
W_{cI}	القدرة المبذولة على ضاغط المرحلة الدنيا	kW
Wc_{II}	القدرة المبذولة على ضاغط المرحلة العليا	kW
Qe_I	سعة المبخر الأول	kW
Qe_{II}	سعة المبخر الثاني	kW
m_I	كتلة مائع التثليج المارة في المبخر الأول	kg/s
m_{II}	كتلة مائع التثليج المارة في المبخر الثاني	kg/s

ويمكن حساب قيمة كتلة مائع التثليج المارة في ضاغط المرحلة العليا بعد تطبيق قانون حفظ الطاقة على خزان التذرير وكما يأتي:

$$m_I h_2 + m_{II} h_6 = m_I h_7 + m_{II} h_3$$

$$m_I(h_2 - h_7) = m_{II}(h_3 - h_6)$$

$$m_{II} = \frac{m_I(h_2-h_7)}{(h_3-h_6)} \qquad (2\text{-}28)$$



6-2 المنظومات التعاقبية Cascade Systems

تتكون المنظومات التعاقبية من دورتي تثليج شبه مستقلتين، وكما هو مبين في الشكل (2-19) الدورة الأولى المبينة باللون الأحمر تُعد دورة خدمية تعمل عند درجات حرارة عليا، حيث يتم ضغط مائع تثليج معين من قبل ضاغط المرحلة العليا ويتم تكثيف بخاره في المكثف، ثم صمام التمدد وبعد صمام التمدد يحدث تداخل بين الدورتين، حيث يستخدم مبخر الدورة ذات درجات الحرارة العالية (المؤشر باللون الأحمر) بتبريد مكثف دورة درجات الحرارة المنخفضة (المؤشر باللون الأزرق) وبعد تبخر مائع دورة التثليج العليا يُعاد سحبه مرة أخرى وضغطه. أما دورة التثليج ذات درجات الحرارة المنخفضة (المؤشرة باللون الأزرق) تسحب مائع التثليج من المبخر ثم تضغطه وبعد ذلك يدفع إلى المكثف المرتبط بمبخر الدورة ذات درجات الحرارة العليا، فيتكثف بخار مائع التثليج ويمر عبر صمام التمدد ثم المبخر ذي درجات الحرارة الدنيا، وهكذا تستمر الدورة، ويبين الشكل (2-20) مخطط الدورة على مخطط الضغط - المحتوى الحراري ويلاحظ من الشكل أن لكل دورة مائع تثليج خاص بها لذا تم رسم كل دورة على المخطط الخاص بها. وتم استحداث هذه الدورة لغرض التخلص من سلبيات الدورة متعددة الضواغط والتي تتلخص في الآتي:

1- في الدورة متعددة الضواغط يجب استعمال مائع تثليج واحد ويجب التقيد بخواص مائع التثليج التي تشمل درجة الحرارة الحرجة ودرجة حرارة الانجماد. أي أن الهبوط بدرجات حرارة المبخر والارتفاع بدرجة حرارة التكثيف تكون محددة تبعاً للعاملين المذكورين في أعلاه.
2- إن عمل المنظومة متعددة الضواغط بمائع تثليج واحد، قد يكون بضغط عالٍ أو واطئ لا يتلاءم مع أغلب موائع التثليج باستثناء مائعي التثليج R-12 ، R-22 والأمونيا. وإذا أريد استعمال مائع آخر، فيجب أن تعمل المنظومة بضغط أوطأ من الضغط الجوي، مما يتطلب أن يكون الضاغط ذا إزاحة كبيرة، فضلاً عن تعرض المنظومة لاحتمال تسرب الهواء الخارجي إلى داخلها.
3- احتمال انتقال الزيت من ضاغط إلى آخر، مما قد يسبب عطل الضاغط.

لذا فإن استخدام المنظومات التعاقبية يمكن أن يعطي المصمم حرية أكبر في اختيار درجات الحرارة العاملة عن طريق حرية اختيار مائع التثليج الملائم لكل دورة تثليج.

ومن تطبيقات المنظومات التعاقبية ما يأتي:

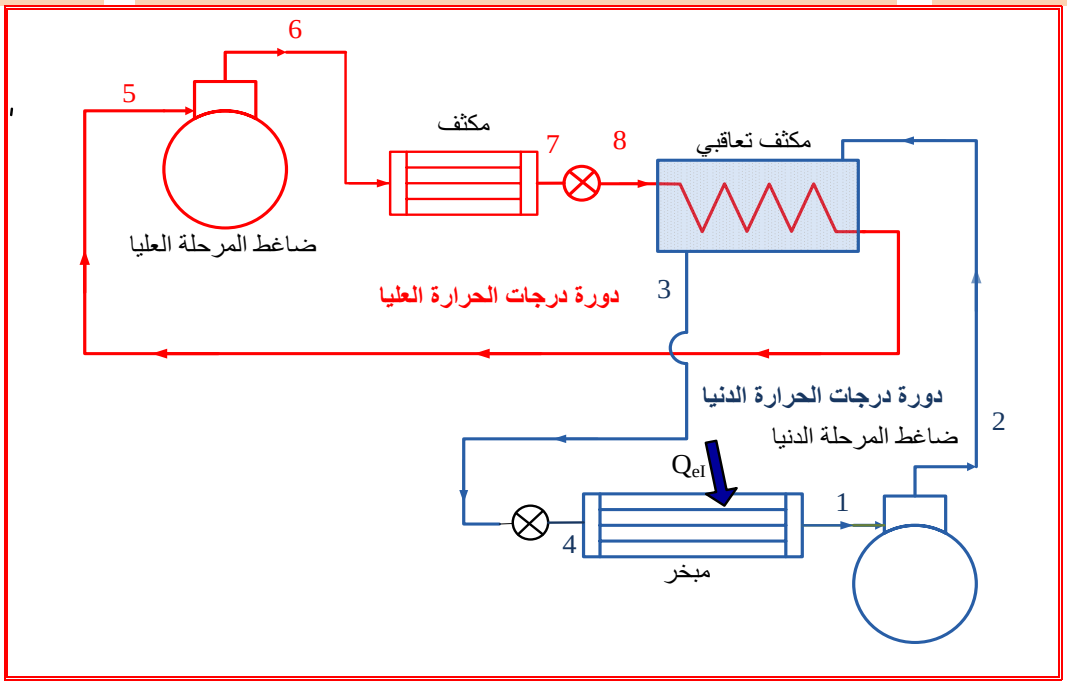
أ- تسييل الغازات الصناعية.
ب- صناعة الثلج الجاف.
ت- التجميد واطئ درجة الحرارة (Deep Freezing) وغيرها.

ويعرّف المكثف التعاقبي على أنه مبادل حراري بين مبخر دورة درجات الحرارة العليا ومكثف درجات الحرارة الدنيا، وتحدد درجة حرارة المكثف التعاقبي المثالية ($T_{cc\ opt}$) (Optimum Cascade Temperature) من القانون الآتي:

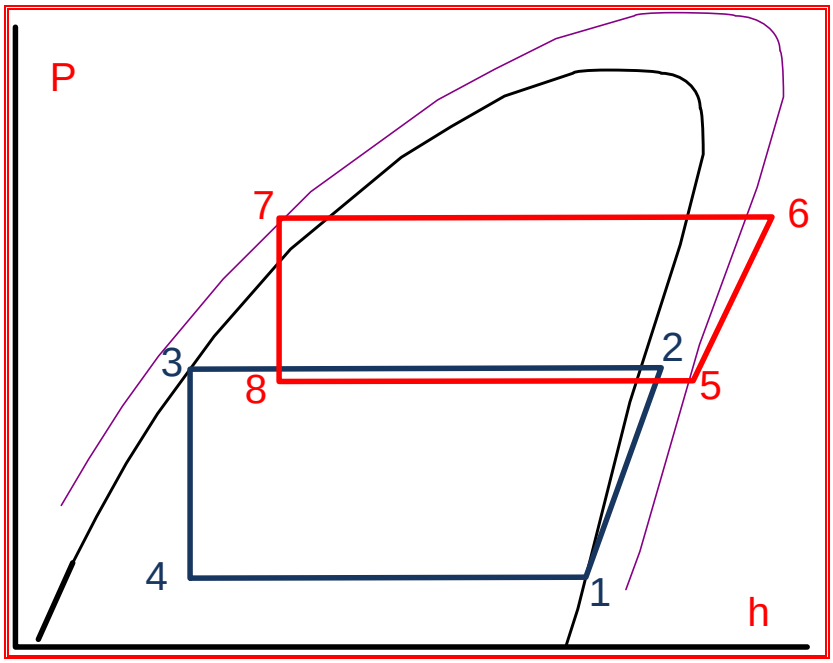
$$T_{CC} = \sqrt{T_e \times T_c} \qquad (2\text{-}29)$$

إذ أن:

T_{cc}	درجة حرارة المكثف التعاقبي المثالية	K
T_e	أدنى درجة حرارة في الدورة (درجة حرارة المبخر)	K
T_c	أعلى درجة حرارة في الدورة (درجة حرارة المكثف)	K



شكل 2-19 منظومة انضغاطية تعاقبية بمرحلتين

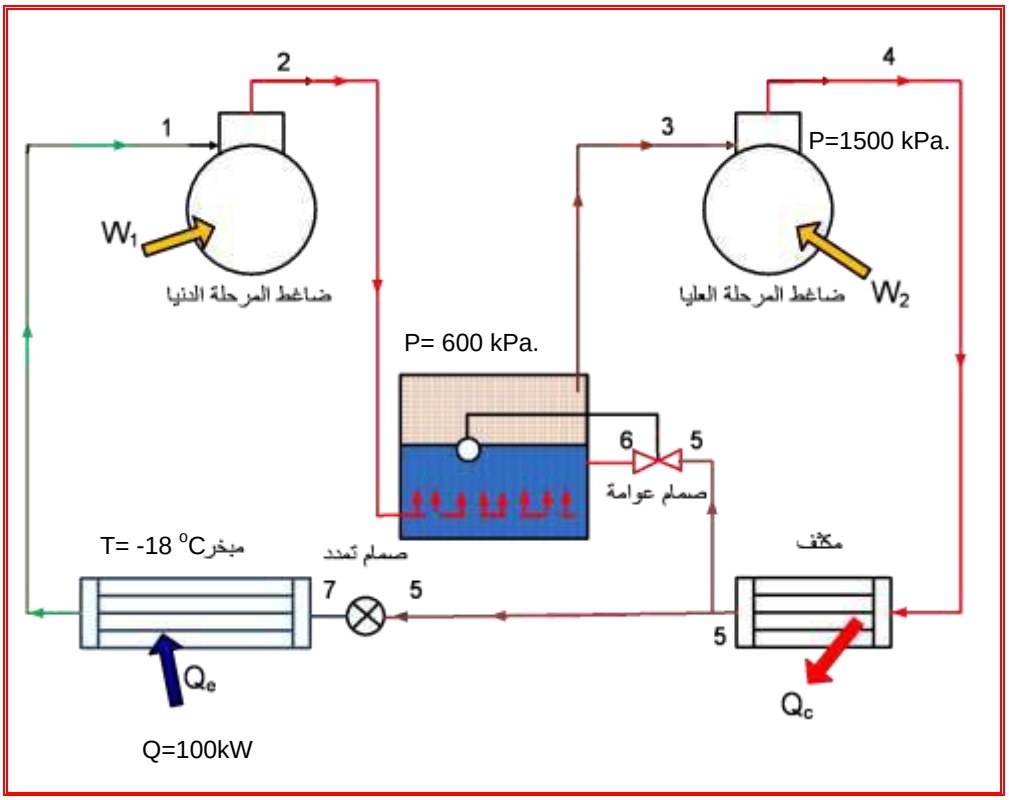


شكل 2-20 دورة التثليج التعاقبية على مخطط الضغط – المحتوى الحراري

مثال محلول (1)

منظومة تثليج تعمل بمرحلة انضغاط واحدة، سعتها 100 kW عند درجة حرارة مبخر (−30°C) وضغط تكثيف 1500 kPa، تم تطويرها إلى منظومة مركبة كما في الشكل (2-21)، وكان الضغط البيني 600 kPa، إذا كان خزان التذرير يعمل كمبرد بيني وليس لإزالة غاز التذرير. وعلى فرض كون المائع R-22 وحالته مشبعة عند الخروج من المبخر، المكثف، المبرد البيني وكان الانضغاط بثبات الانتروبي. احسب:

1. الطاقة المصروفة للمنظومة الاعتيادية
2. الطاقة المصروفة للمنظومة المركبة
3. قارن بين معامل الأداء للمنظومتين
4. قارن بين درجات الحرارة للمائع الداخل للمكثف في المنظومتين



شكل2-21 منظومة المثال الأول

الحل

أولاً: عندما تكون منظومة انضغاطية بمرحلة انضغاط واحدة.

المعطيات

منظومة انضغاطية بمرحلة واحدة تعمل بمائع التثليج R-22

درجة حرارة المبخر $(-30°C)$ ، ضغط المكثف 1500 kPa

حالة مائع التثليج مشبع عند الخروج من المبخر والمكثف، والانضغاط بثبات الانتروبي.

المطلوب

أ- الطاقة المصروفة للمنظومة

ب- معامل أداء المنظومة

ج- درجة حرارة المائع الخارج من الضاغط

طريقة الحل:

اعتماداً على المعطيات أعلاه، يتم تمثيل الدورة للمنظومة على مخطط ضغط –محتوى حراري للمائع R-22 وكما هو مبين بالشكل (2-22)

$h_3=h_4$	h_2	h_1
248.4	449.9 kJ/kg	392.7 kJ/kg

تحسب الطاقة المصروفة في المنظومة عن طريق ضرب شغل الانضغاط للمائع خلال العملية ا←2 في كتلة مائع التثليج.

$$W= m (h_2-h_1)$$

حيث أن m هو معدل التدفق الكتلي لمائع التثليج خلال الضاغط، وهو مساوي لمعدل التدفق الكتلي للمائع m خلال المبخر. وبما إن سعة المنظومة التثليجية معلومة، وحسابها ينتج من خلال تطبيق معادلة سعة المنظومة Q_e وهي:

$$\mathbf{Q_e = m (h_1 - h_4)}$$

إذاً قيمة m يمكن الحصول عليها

$$m = \frac{Q_e}{(h_1-h_4)} = \frac{100}{(392.7-248.4)} = 0.693\ kg/s$$

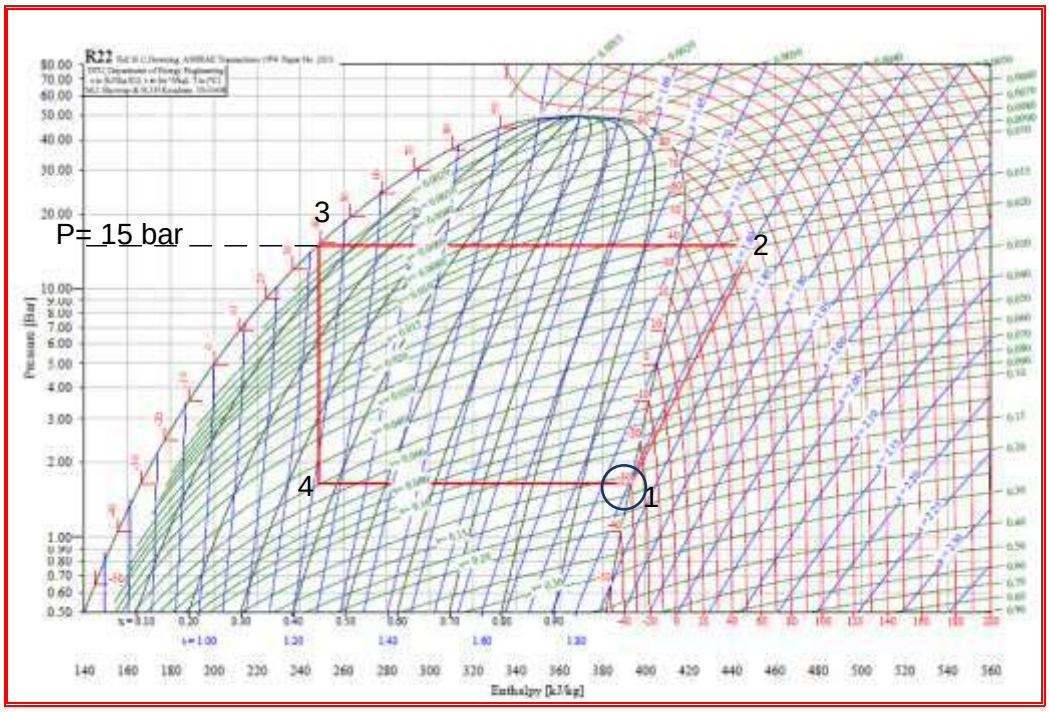
بعد معرفة قيمة التدفق الكتلي، يتم حساب طاقة الانضغاط، وذلك لمعلومية الشغل النوعي (h2-h1)، لأن قيم المحتوى الحراري تم تحديدها من المخطط وكما جاء في أعلاه.

طاقة الانضغاط = معدل التدفق الكتلي × الشغل النوعي

$W_c= m (h_2-h_1) = 0.693 \times (449.9 - 392.7) = 39.64$ kW

وبعد حساب شغل المنظومة يمكن حساب معامل أدائها، لأنه يساوي السعة التثليجية للمنظومة مقسوماً على شغل الانضغاط:

$$COP = \frac{Q_e}{W_c} = \frac{100}{39.64} = 2.523$$



شكل 2-22 دورة التثليج على مخطط الضغط – المحتوى الحراري

ويمكن معرفة درجة حرارة تجهيز بخار مائع التثليج، النقطة (2) من مخطط الضغط – المحتوى الحراري الذي يساوي (76.93°C).

ثانياً: عندما تكون منظومة انضغاطية بمرحلتي انضغاط.

المعطيات

منظومة انضغاطية بمرحلتي انضغاط تعمل بمائع التثليج R-22

درجة حرارة المبخر (−30°C)، ضغط المكثف 1500 kPa

المبرد البيني وخزان التذرير بضغط 600 kPa

حالة مائع التثليج مشبع عند الخروج من المبخر والمكثف والانضغاط بثبوت الانتروبي.

المطلوب

1- الطاقة المصروفة للمنظومة

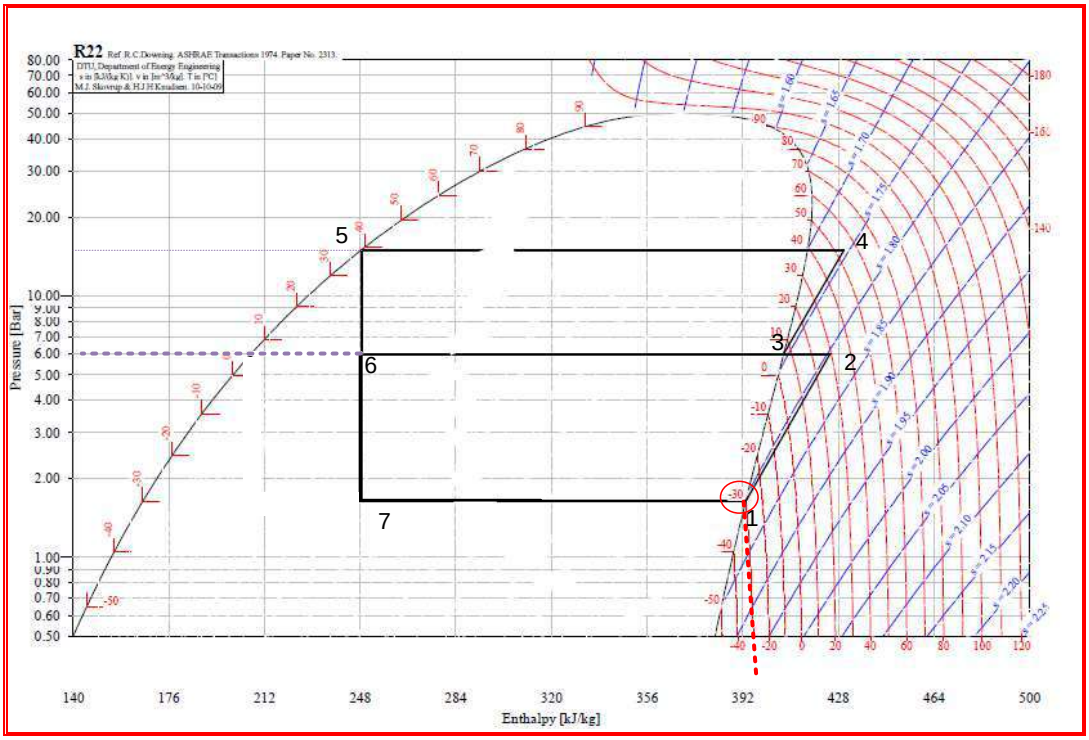
2- معامل أداء المنظومة

3- درجة حرارة المائع الخارج من ضاغط مرحلة الانضغاط العالي

طريقة الحل:

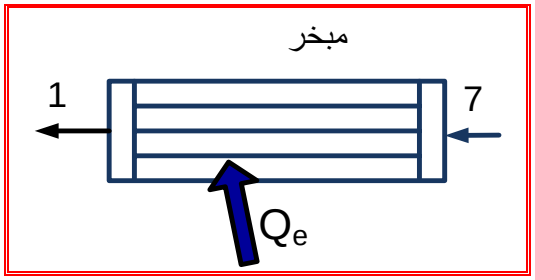
اعتماداً على المعطيات المذكورة، يتم تمثيل الدورة للمنظومة على مخطط ضغط - محتوى حراري للمائع R-22 وكما هو مبين بالشكل (2-23)

$h_5 = h_6 = h_7$	h_4	h_3	h_2	h_1
248.4	429.9	407.2	424.4	392.7



شكل 2-23 مخطط الدورة على مخطط الضغط – المحتوى الحراري

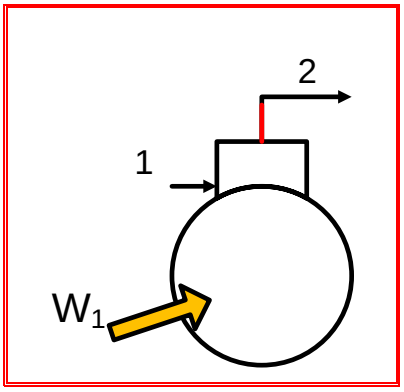
وبالاعتماد على معادلات الحل بالجزء الأول ومعادلات المادة العلمية في متن الفصل يمكن حساب معدل التدفق الكتلي خلال ضاغط المرحلة الدنيا، من خلال حساب معدل التدفق الكتلي خلال المبخر m_{eI}. وتطبيق معادلة سعة المنظومة Q_e وهي :



$$Q_e = m_{eI} (h_1 - h_7)$$

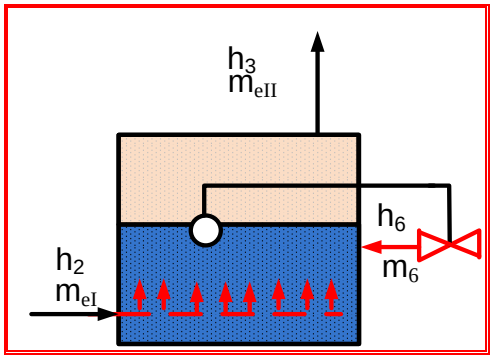
$$m_{eI} = \frac{Q_e}{(h_1 - h_7)} = \frac{100}{(392.7 - 248.4)} = 0.693\ kg/s$$

بعد معرفة قيمة التدفق الكتلي ، يتم حساب طاقة الانضغاط وكما يأتي:



$W_1 = m_{eI}\,(h_2 - h_1) = 0.693\ (\ 424.4 - 392.7) \quad = 21.97\ kW$

إن معدل التدفق الكتلي خلال مرحلة الانضغاط العليا، m_{eII} يمكن حسابه من تطبيق معادلة حفظ الطاقة على المبرد البيني، وكما يأتي:



$m_{eI} + m_6 = \ m_{eII}$

$m_6 \ = m_{eII} - m_{eI}$

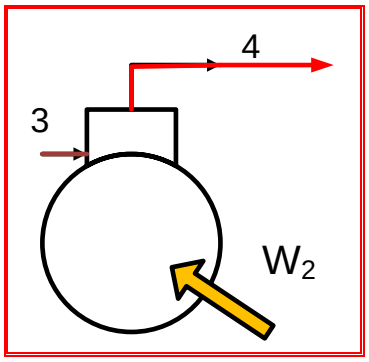
$m_{eI} \times h_2 + m_6 \times h_6 = m_{eII}.h_3$

$m_{eI} \times h_2 + (m_{eII} - m_{eI}) \times h_6 = m_{eII} \times h_3$

$m_{eI} \times (h_2 - h6) = m_{eII} \times (h_3 - h6)$

$$m_{eII} = \frac{m_{eI}(h_2 - h_6)}{h_3 - h_6} = \frac{0.693(424.4 - 248.4)}{407.2 - 248.4} = 0.768\ kg/s$$

تحسب الطاقة المصروفة في ضاغط المرحلة العليا كما يأتي:



$$W_2 = m_{eII} (h_4 - h_3) = 0.768 (429.6 – 407.2) = 17.2 \text{ kW}$$

وبما إن شغل الانضغاط للمنظومة يساوي شغل الانضغاط لمرحلتي الانضغاط

$$W = W1 + W2 = 21.97 + 17.2 = 39.17 \text{ kW}$$

$$COP = \frac{Q_{eI}}{W_{1+}W_2} = \frac{100}{21.97+17.2} = 2.553$$

إما درجة حرارة تجهيز بخار مائع التثليج من ضاغط المرحلة العليا فتستخرج من مخطط الضغط – المحتوى الحراري وتساوي (53.33°C) في حين أنها تساوي (28.94°C) بعد ضاغط المرحلة الدنيا.

من النتائج أعلاه، يلاحظ أن تبديل المنظومة من مرحلة انضغاط واحدة إلى مرحلتي انضغاط، نتج عنه ما يأتي :

1- لم يكن هنالك تأثير كبير في معامل الأداء COP، بل كانت نسبة الزيادة بحدود 2.1%.
2- هنالك تأثير كبير في درجة الحرارة الخارجة من مرحلة الانضغاط والداخلة للمكثف يساوي تقريبا (24°C).

أسئلة الفصل الثاني

س1) عرّف ما يأتي:

منظومة التثليج المركبة، المنظومة التعاقبية، غاز التذرير، خزان التذرير، التبريد البيني.

س2) اشرح معززاً إجابتك بالرسم مع التأشير على الأجزاء، ورسم مخطط ضغط – محتوى حراري، لكل مما يأتي:

أ- منظومة انضغاطية تعاقبية بمرحلتين.

ب- منظومة بمبخرين وضاغطين.

ت- منظومة بمرحلة انضغاط واحدة ومبخرين بدرجات حرارة مختلفة.

ث- منظومة بمرحلتي انضغاط مع خزان تذرير يستخدم كمبرد بيني.

ج- منظومة بمرحلتي انضغاط مع إزالة غاز التذرير باستخدام خزان تذرير ومبادل حراري

س3) علل ما يأتي:

1. استعمال منظومة التثليج المركبة.
2. إزالة غاز التذرير لمائع التثليج قبل دخوله المبخر في بعض منظومات التثليج.
3. استعمال المبرد البيني في بعض منظومات التثليج.
4. استعمال صمام تقليل الضغط في المنظومات متعددة المبخرات والمختلفة في درجات الحرارة.

س4) للتبريد البيني في منظومات التثليج المركبة:

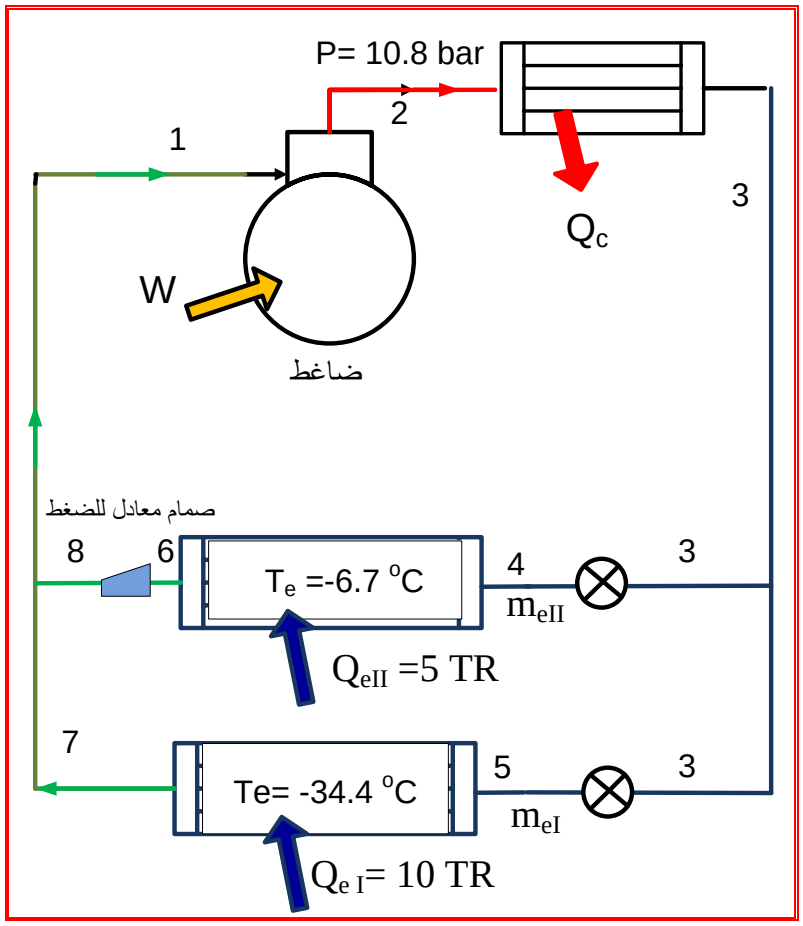
1. عدد الأنواع، موضحاً إياها بالرسم.
2. اذكر المعادلات الحاكمة لها.
3. قارن بين الأنواع المستخدمة.

س5) ما مقدار الطاقة اللازمة لضغط 20 kg/min من الأمونيا، من بخار مشبع بضغط مقداره 1.4 bar إلى ضغط تكثيف 10 bar، وباستخدام مرحلتي انضغاط وتبريد بيني بواسطة سائل مائع التثليج عند 4 bar، إذا كان سائل مائع التثليج يترك المكثف مشبعاً، وبخاره يترك المبخر بحالة تشبع.

س6) الشكل في أدناه يمثل منظومة انضغاطية تعمل بالأمونيا كمائع تثليج، ولها مبخران يعملان بسعات ودرجة حرارة كما مؤشر بالشكل. إذا كان ضغط المكثف 10.8 bar، وعلى فرض كون الانضغاط بثبوت الإنتروبي، وإن المائع يخرج من المبخر والمكثف بحالة مشبعة، بعد تمثيل الدورة على مخطط ضغط – محتوى حراري للمائع R-717، احسب:

أ- مقدار طاقة الانضغاط بوحدات kW للمنظومة

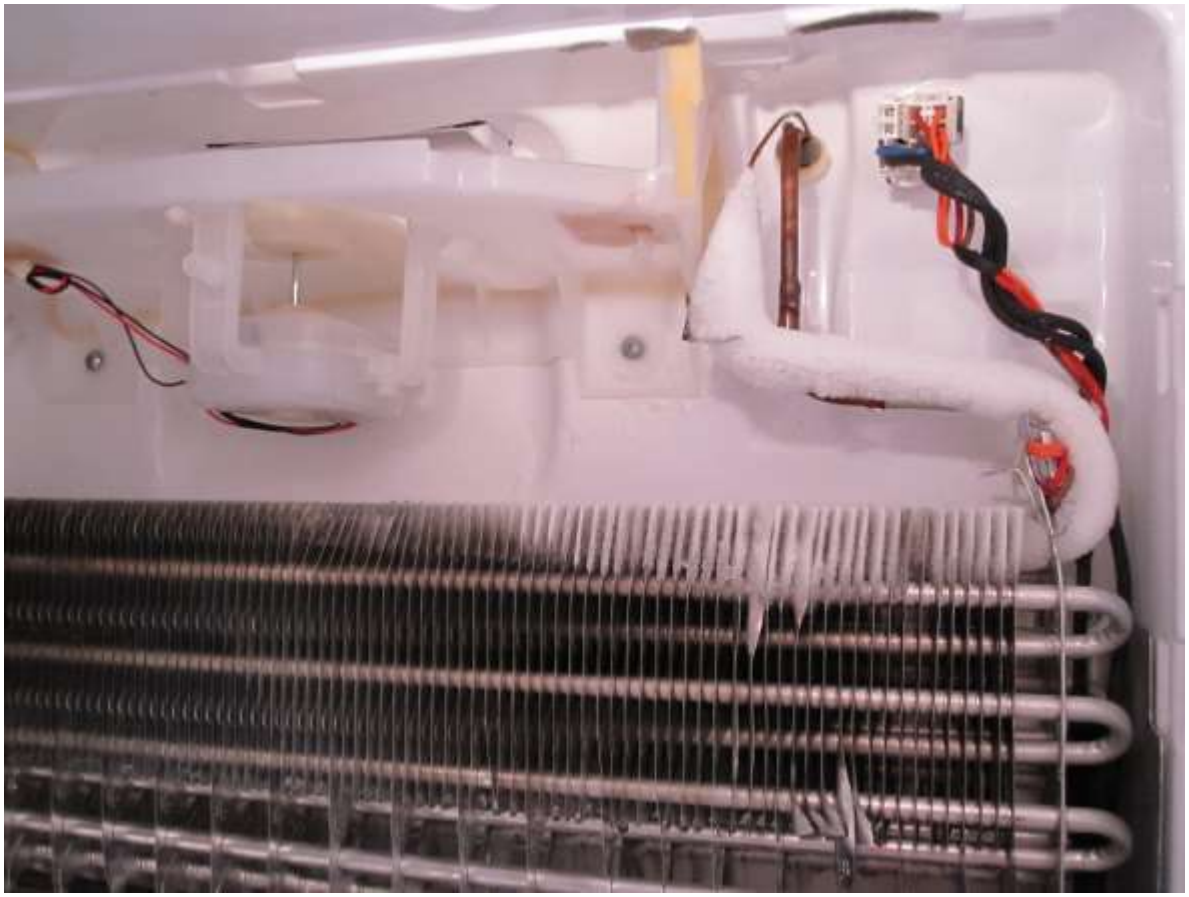
ب- إذا تم استبدال المنظومة بأخرى تعمل بضاغطين، ما مقدار طاقة الانضغاط المطلوبة بوحدات kW.



الفصل الثالث

إزالة الجليد

Defrosting



إزالة الجليد

Defrosting

1-3 مقدمة Introduction

إن أحد الشروط الواجب توافرها لعمل منظومة التثليج الانضغاطية بشكل سليم وأمين، هو عودة مائع التثليج ليدخل الضاغط من المبخر على شكل بخار، وهذا يتطلب أن يتبخر مائع التثليج بشكل كامل. وحتى تتم عملية التبخر، يجب أن تسهل عملية انتقال الحرارة من الحيز المطلوب تبريده عبر جدار المبخر إلى مائع التثليج المار خلال المبخر (أي أن تكون المقاومة الحرارية بين مائع التثليج والحيز المبرد أقل ما يمكن وحسب التصميم الأساسي للمنظومة)، ولكي تعمل المنظومة بكفاءة يجب أن تكون عملية انتقال الحرارة خلال المبخر ذات كفاءة عالية، ومن العوامل المؤثرة في هذه الكفاءة تراكم الأوساخ والجليد على سطح ملف المبخر.

إن قيمة العزل الحراري للجليد تعتمد بشكل أساسي على وجود الهواء بداخله (لأن الهواء ذو موصلية رديئة لانتقال الحرارة) وكذلك سمك طبقة الجليد المتكونة فوق ملف المبخر. إن الجليد تحت درجة حرارة الصفر السيليزي بقليل سيكون خفيف الوزن كبير الحجم لاحتوائه على كمية كبيرة من الهواء، لكنه يذوب أسرع من تلك الطبقة الصلبة من الثلج الناتج عن درجات الحرارة المنخفضة.

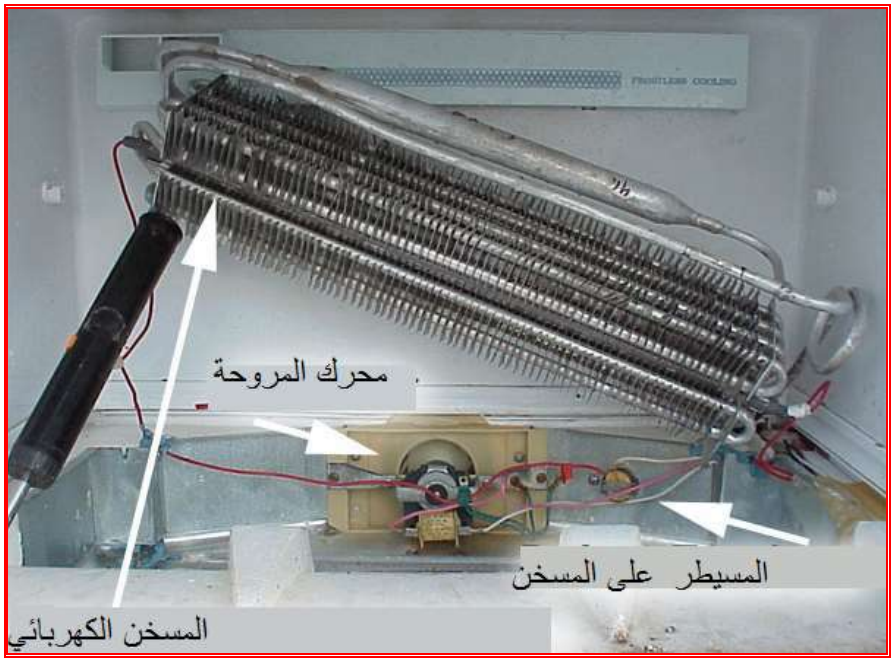
إن عملية إذابة الجليد تُعد من الضروريات الواجب تنفيذها، ففي بعض الثلاجات والمجمدات المنزلية تتم يدوياً وبشكل منتظم رغم إنها تسبب بعض الإشكالات البسيطة من خلال إيقاف الجهاز وترك المبخر معرضاً للجو الخارجي لفترة من الزمن إلى أن يذوب الجليد ثم ينظف ويعاد تشغيله. ويمكن أن تزاد[سرعة ذوبان الجليد بوضع إناء يحتوي على ماء ساخن في المبخر. وتجدر الإشارة إلى ضرورة الابتعاد عن إزالة الجليد من المبخر باستخدام أدوات حادة، كي لا يتضرر سطح المبخر ويتسرب مائع التثليج منه.

2-3 طرائق إزالة الجليد التلقائية Automatic Defrost Methods

إن الأجهزة التجارية واغلب الأجهزة المنزلية الحديثة تكون مزودة بمُعدات إذابة الجليد التلقائية، وبشكل عام هنالك العديد من الطرائق لإزالة الجليد من المبخر، ويمكن أن تقسم إلى قسمين هما:

1-2-3 إذابة الجليد باستخدام المسخنات الكهربائية

في وحدات التثليج ذات السعات الصغيرة، تكون هنالك مسخنات كهربائية حول المبخر، وكما موضح بالشكل (3-1)، قسم منها تكون بتماس مع الزعانف وأخرى في حوض المبخر. تكون هذه المسخنات مربوطة على التوازي لكي يكون عملها مضمون إذا تعطل أو تلف أحداها، ويستخدم مع هذه المنظومة مؤقت زمني (Timer) أو منظم درجة حرارة ثلاثي (Defrost Thermostat) .



شكل 3-1 المسخن الكهربائي لإذابة الجليد

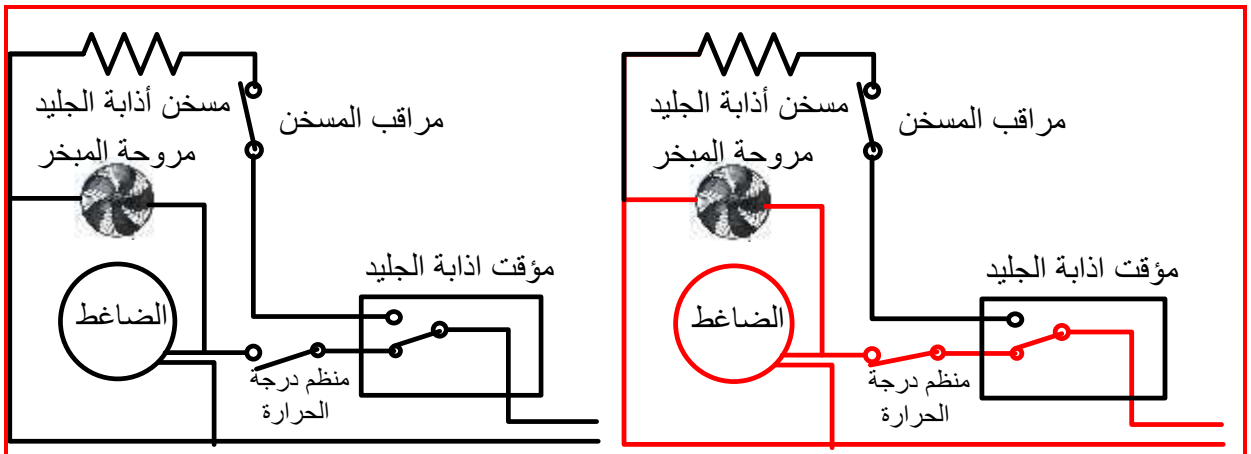
إن المسخنات هي عبارة عن مقاومة كهربائية تلامس معدن المبخر من الخارج أو بين أنابيب المبخر مع الأخذ بنظر الاعتبار وجوب العزل الكهربائي بين المقاومة ومعدن المبخر.

إن استخدام منظم درجة الحرارة الثلاثي (كما في الثلاجات ذات البابين)، يقوم بفصل التيار عن الضاغط عند انخفاض درجة الحرارة وإيصال التيار إلى المسخن. وعند عمل المسخن يقوم الجليد بامتصاص الحرارة متحولاً إلى ماء، وبعد أن تتم إذابة جميع الجليد وترتفع درجة الحرارة في الثلاجة، حينها يقوم المنظم بفصل التيار عن المسخن وتوصيل دائرة التثليج (الضاغط)، وحسب التنظيم الذي بُني عليه المنظم. إما عند استخدام المؤقت (Timer) كما هو الحال في الثلاجات التي يطلق عليها اسم No-Frost والتي تستخدم مبخرات مزعنفة ومروحة لتحريك الهواء، تكون وظيفة المؤقت هي تنظيم إيصال التيار بين منظومة التبريد (الضاغط) ودائرة التذويب (المسخن)، حيث أنه في فترة فصل التيار عن الضاغط يتم إيصال التيار إلى المسخن ليعطي الحرارة اللازمة لإذابة الجليد.

إن عمل المؤقت يعتمد بشكل أساسي على الوقت المحدد لعملية التثليج وكذلك إذابة الجليد، حيث يعمل لفترة تثليج بحدود سبع ساعات أو أكثر مع فترة إذابة بحدود نصف ساعة أو أقل وحسب نوع المؤقت وتصميمه.

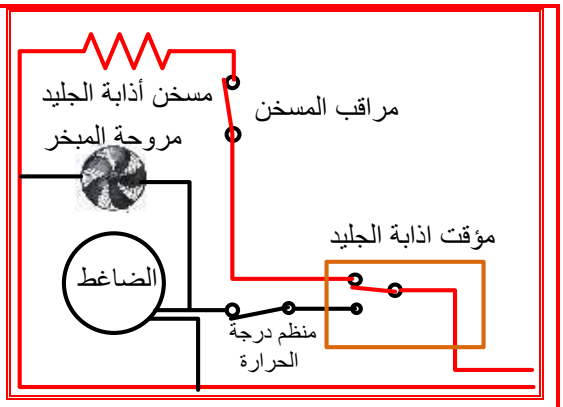
ويبين الشكل (3-2) طريقة السيطرة على الدائرة الكهربائية للثلاجة المذيبة للجليد تلقائياً ويمكن تلخيص عمل دورة إذابة الجليد كما يأتي:

هنالك ثلاث حالات في ثلاجة إذابة الجليد تلقائياً هي دورة عمل وإطفاء الضاغط، التي من خلالها يتم السيطرة على عمل الضاغط، وكما هو مبين في الشكل (3-2 أ) الذي يبين عمل دورة التثليج بشكل طبيعي، أما الشكل (3-2 ب) فيبين توقف ضاغط ثلاجة إذابة الجليد تلقائياً بسبب وصول درجة حرارة الحيز المثلج إلى درجة الحرارة المطلوبة عندها يفصل منظم درجة الحرارة، في حين أن الشكل (3-2 ت) يبين تحسس منظم عمل المسخن بوجود جليد قد تراكم على المبخر لذا يبدأ بإيصال التيار الكهربائي إلى السلك الساخن الخاص بإذابة الجليد وعندها يفصل التيار الكهربائي عن الضاغط ويمرر التيار إلى السلك الساخن الذي يقوم بإذابة الجليد، وأخيراً الشكل (3-2 ث) الذي يبين تحسس المسيطر على عمل المسخن بارتفاع درجة الحرارة يقوم بفصل التيار الكهربائي عن المسخن مع استمرار فصل التيار الكهربائي عن الضاغط.

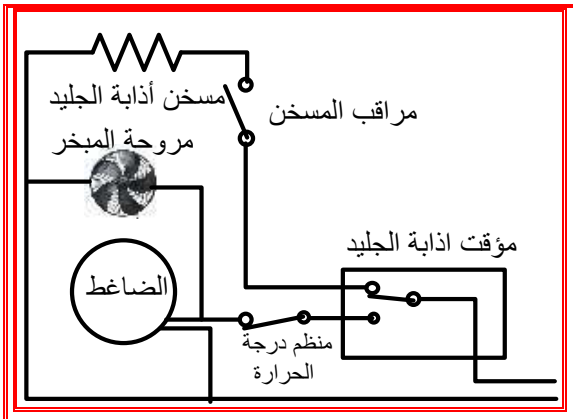


شكل 3-2 أ عمل الضاغط ومروحة المبخر، فصل مسخن إذابة الجليد

شكل 3-2 ب توقف الثلاجة بالكامل، فصل منظم درجة الحرارة



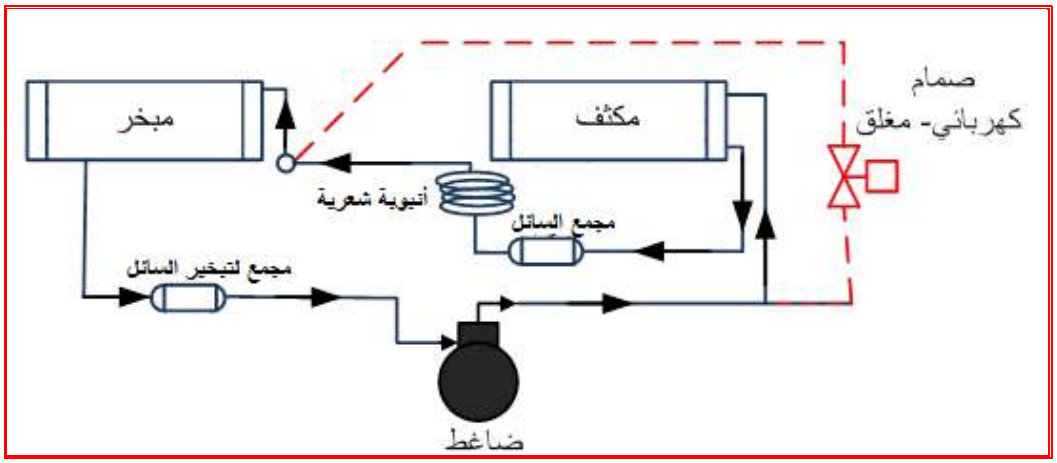
شكل3-2 ت عمل مسخن إذابة الجليد ويلاحظ فصل الضاغط من قبل مؤقت إذابة الجليد



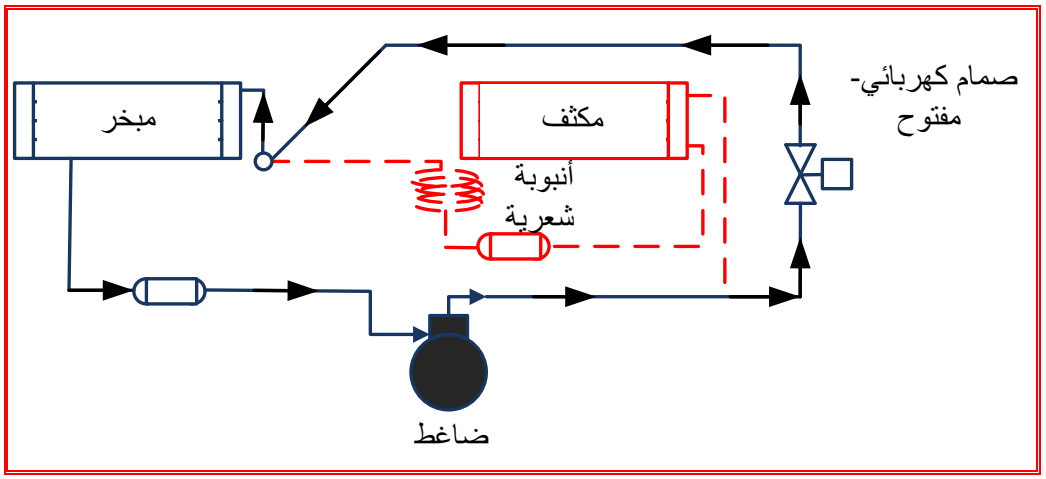
شكل 3-2 ث توقف مسخن إذابة الجليد عن العمل عن طريق فصله من قبل مراقب المسخن وتوقف الدورة بالكامل

3-2-2 إذابة الجليد باستخدام الغاز الساخن

يستخدم بخار المائع الخارج من الضاغط لإذابة الجليد في المنظومات ذات السعات الكبيرة، حيث يمرر الغاز الساخن إلى المبخر بواسطة صمام ذي ملف لولبي كهربائي (Solenoid Valve) مباشر كما موضح بالإشكال (3-3)، (3-4) حيث يربط ملف الصمام مع مؤقت زمني، يتم فتح الصمام عند بدء عملية إذابة الجليد ثم يغلق. ويلاحظ إن المنظومة تستمر بالعمل في أثناء عملية إزالة الجليد بعكس إزالة الجليد باستخدام المسخنات الكهربائية التي تتطلب توقف المنظومة عن العمل. إلا أن مراوح المبخر يجب فصلها عن العمل في كلتا الطريقتين. ومن الشكل (3-3) نلاحظ عملية تبريد طبيعية في المنظومة، حيث يدفع بخار مائع التثليج من الضاغط إلى المكثف ثم الأنبوب الشعري فالمبخر ومنها إلى الضاغط. ويلاحظ غلق صمام الملف الكهربائي وعزل الخط ذي اللون الأحمر. أما في دورة إذابة الجليد الموضحة في الشكل (3-4) فيلاحظ عند عمل المؤقت ترسل إشارة إلى صمام الملف اللولبي ليفتح وعندها سيذهب بخار مائع التثليج الساخن عبر صمام الملف اللولبي إلى المبخر مباشرة، دون مروره بالمكثف وتستمر العملية فترة معينة من الزمن بعد ذلك يغلق الصمام وتستمر الدورة كما هو معتاد.



شكل 3-3 منظومة إزالة الجليد باستخدام الغاز الساخن- حالة عمل اعتيادية

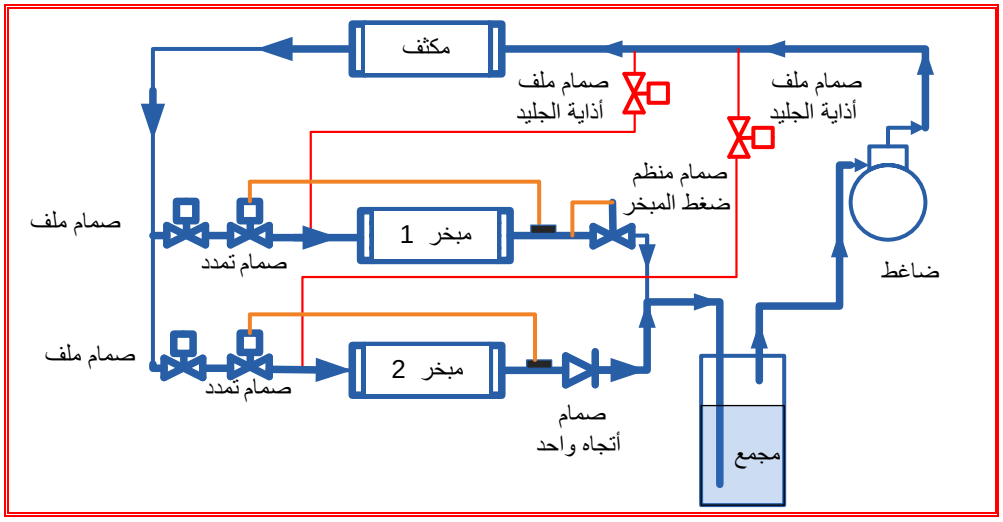


شكل3-4 منظومة إزالة الجليد باستخدام الغاز الساخن- حالة إذابة الجليد

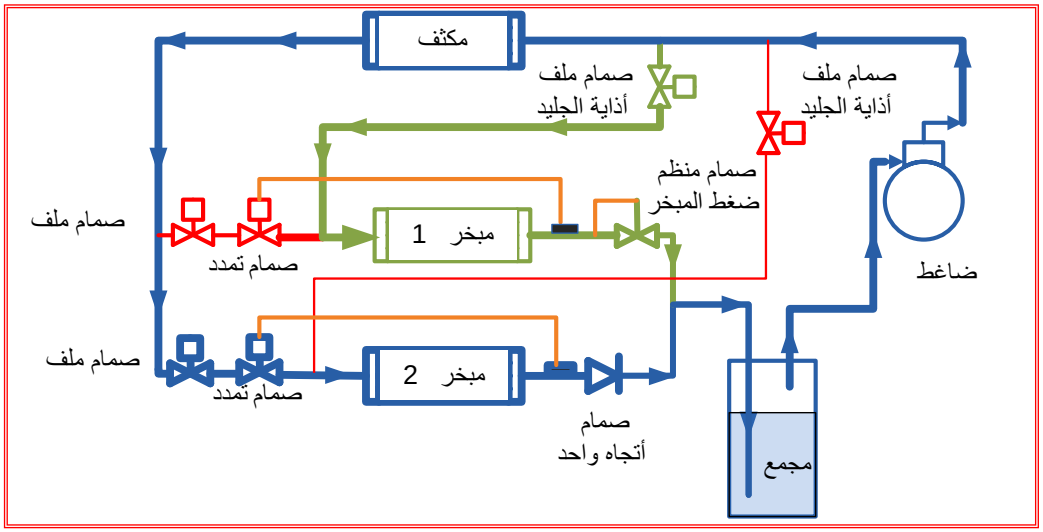
وفي حالة وجود أكثر من مبخر عامل في الدورة فتتم السيطرة على إذابة الجليد بعدة صمامات ملف كهربائي، وكما مبين في الشكل (3-5)، ويمكن تلخيص عملية إذابة الجليد بالخطوات التالية، في حال عدم وجود جليد على أي من المبخرات يعمل الضاغط لدفع بخار مائع التثليج إلى المكثف، ومنه إلى صمام الملف الكهربائي لكلا المبخرين ومن ثم إلى صمام التمدد لكل مبخر، وتتم عملية التثليج وتبخر سائل مائع التثليج، ومن ثم دفع البخار إلى الضاغط، وكما هو مبين في الشكل (3-5 أ).

أما في حال تراكم الجليد على المبخر رقم (1) فيتحسس أو يعمل الموقت المسيطر على صمام الملف الكهربائي المرتبط بالمبخر رقم (1) وتغلق الصمامات الأخرى الموجودة على مدخل المبخر رقم (1) ويبدأ بخار مائع التثليج بالمرور مباشرة إلى المبخر الأول كما هو مبين في الشكل (3-5 ب) في اللون الأخضر، في حين أن المبخر رقم (2) يستمر بالعمل، والحالة الأخيرة هي عند تراكم الجليد على المبخر رقم (2) فعندها يفتح صمام الملف الكهربائي الخاص بإذابة جليد المبخر رقم (2) ويغلق الصمام

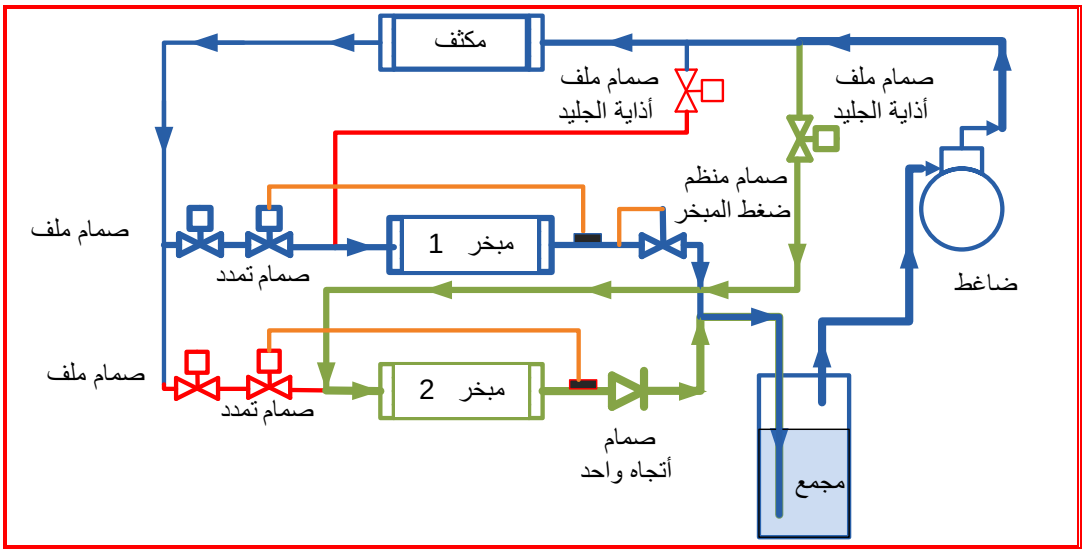
المثبت على مدخل المبخر رقم (2) وعندها يمر بخار مائع التثليج مباشرة إلى المبخر رقم (2) وكما مؤشر باللون الأخضر في الشكل (3-5 ت)، ويلاحظ من الشكل استمرار عمل المبخر رقم (1)، ويمكن أن تحدث حالة رابعة وهي إذابة الجليد على كل من المبخرين العاملين، ويفضل عدم اللجوء إلى هذه الحالة كونها تشكل جهداً على الضاغط، لذا جرت العادة على إذابة الجليد من على المبخرات بخطوات متتابعة.



شكل 3-5 أ كلا المبخرين عاملان في الدورة



الشكل 3-5 ب إذابة الجليد من على المبخر رقم (1) واستمرار عمل المبخر رقم (2)



شكل 3-5 ت إذابة الجليد من على المبخر رقم (2) واستمرار عمل المبخر رقم (1)

3-3 أسباب تراكم الجليد

إن المصدر الأساسي لتراكم الجليد على المبخر هو الهواء الرطب، حيث أن بخار الماء في الهواء يتكثف عند هبوط درجة حرارته إلى نقطة الندى، وبالتالي تكثفه على ملف التبريد ومن ثم انجماده عند درجات الحرارة المنخفضة ومنها يتكون الجليد، ولتلافي تراكم الجليد على المبخر أو التقليل منه يجب عدم السماح لدخول الهواء إلى المبخر وذلك من خلال عدم فتح باب الثلاجة إلا للضرورة ولفترات قصيرة جداً. إضافة لعملية تغليف المواد الغذائية بعوازل كي لا تفقد الماء الذي تحتويه مما يسبب تكون الجليد وتلف المواد الغذائية، لذلك يتم تصميم باب الثلاجة ليمنع دخول الهواء من خلال تزويده بشريط يصنع من المطاط المرن المانع لتسرب الهواء ويثبت بمادة لاصقة أو بمغناطيس.

أسئلة الفصل الثالث

س1:

ناقش تأثير الأوساخ والجليد المتراكم على أداء منظومة التثليج.

س2:

اشرح مستعيناً بالرسم طرائق إزالة الجليد باستخدام:

أ- المسخنات الكهربائية.

ب- الغاز الساخن.

س3:

علل ما يأتي:

أ- انخفاض كفاءة منظومة التثليج عند تراكم الجليد على مبخر المنظومة.

ب- إزالة الجليد من مبخرات منظومات التثليج.

ت- إمرار الغاز الساخن في بعض مبخرات منظومات التثليج.

ث- ذوبان الجليد من المبخر عند إمرار الغاز الخارج من الضاغط.

س4:

وضح بالرسم دائرة سريان مائع التثليج ذات الإذابة

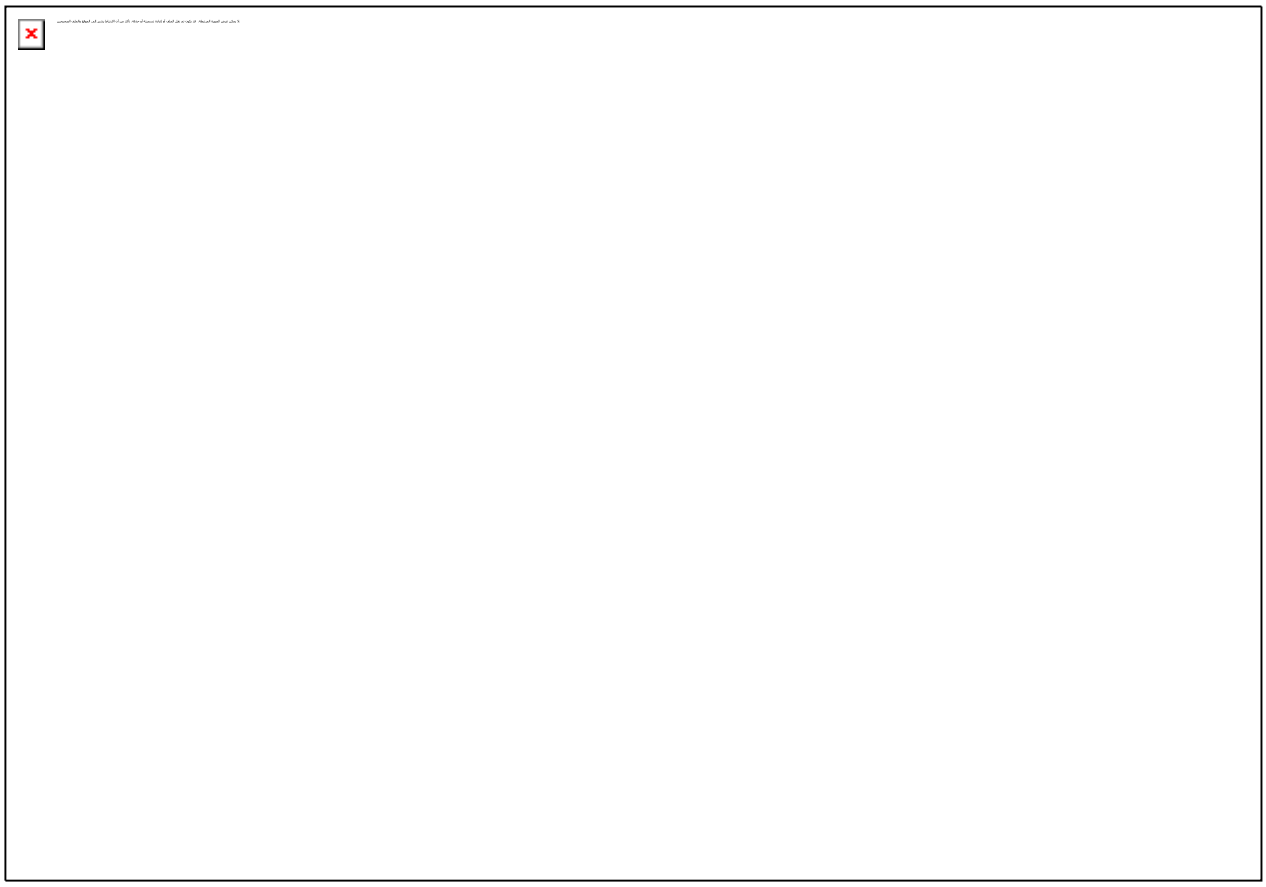
أ- باستخدام الصمام اللولبي الكهربائي لمنظومة بمبخر واحد.

ب- لمنظومة متعددة المبخرات.

الفصل الرابع

حفظ الأغذية

Food Preservation



حفظ الأغذية

Food Preservation

1-4 مقدمة Introduction

يعرّف حفظ الأغذية على أنه عملية منع أو تعطيل تلفها بطريقة أو بأخرى، لهذا من الضروري معرفة الأسباب التي تؤدي للتلف حتى يمكن اختيار وتطوير طرق المحافظة عليها. إن تلف المنتجات الغذائية يتسبب في انخفاض الجودة والنوعية، وبالتالي نقص في القيمة التجارية والخسارة الاقتصادية.

في خمسينيات القرن الماضي بينت بعض الدراسات في الولايات المتحدة الأمريكية، ضخامة الخسائر المالية بسبب تلف المحاصيل الزراعية، كما أوضحت هذه الدراسات إن أسباب التلف تعود إلى سوء النقل والخزن والحفظ، لذلك تمت الدعوة لإيجاد طرق متطورة للتقليل من هذه الخسائر، ولذلك اتجهت البحوث والدراسات لدراسة طرائق الخزن والتبريد بشكل علمي. وتم التركيز على دراسة العمليات الكيميائية والبيولوجية التي تحدث للمنتج عند خزنه، ومن المعروف أن الفواكه والخضر التي تُعد من المنتجات الحية تستمر في عملياتها البيولوجية حتى عند خزنها، ولهذا يحدث تولد للحرارة الكامنة والمحسوسة في المخزن المبرد، كما يتأثر المنتج الزراعي عند خزنه بعدة عوامل منها معدل التجميد وسرعة فقدان الرطوبة منه ومدى احتوائه على الأنزيمات الطبيعية والأحياء الدقيقة الميكروية (Microorganisms) التي تُعد من أهم العوامل التي تسبب تلف الغذاء المخزون، لذلك يجب السيطرة على هذه الكائنات لإطالة مدة الخزن إلى أكبر مدى ممكن بدون تلف للأغذية.

إن الكائنات العضوية الدقيقة من بكتريا وأعفان وفيروسات التي توجد في الهواء والماء والتربة والأغذية الحية وغير الحية، والتي تساهم بشكل فعال في تلف المواد الغذائية، بسبب زيادة فعالياتها وخصوصا في الأماكن الرطبة والدافئة مما يؤدي إلى فقدان الطعم وتولد الروائح والإفرازات الصمغية.

2-4 الكائنات العضوية الدقيقة

تقسم الكائنات العضوية الدقيقة التي تتسبب في تلف الأغذية إلى:

1. البكتريا Bacteria وهي من أهم مسببات تلف الأغذية بالأخص تلك التي تحتوي على كميات كبيرة من الماء، في حين أن الأغذية الجافة والحامضية تولدان جواً يعيق نمو البكتريا ولكن لا يعيق نمو الخمائر والأعفان.

2. الأعفان Molds وتتكاثر بشكل كبير في الأسطح الرطبة والأجبان والأطعمة الفاسدة.
3. الفيروسات Viruses وتتواجد في بعض المنتجات الحيوانية وفي العاملين الذين يقومون بنقل الأغذية في المخازن المبردة. ويمكن للفيروسات أن تتكاثر بشكل كبير في الأطعمة المعرضة للجو عند التأخر عن طبخها.

3-4 فترات فساد المواد الغذائية

تقسم فترات فساد المواد الغذائية إلى:

1. فترة الطور المتأخر Lag Phase وهي الفترة الزمنية اللازمة للملوثات الموجودة في الطعام لكي تتأقلم مع المناخ الجديد، وتُعد هذه الفترة هي أهم فترة إذ أن طولها يعني طول فترة خزن الأغذية، أي أن فترة الخزن تتناسب طردياً مع هذه الفترة، ويجب العمل على إطالتها، لأن طول هذه الفترة يعني طول فترة الخزن.
2. فترة النمو الأساسي Exponential Growth وهي الفترة التي تبدأ بعد استقرار حالة الملوثات، وبعدها تبدأ كل 20 إلى 30 دقيقة إذا كانت الأجواء مناسبة.
3. فترة السكون Stationary: وهي الفترة التي يتوقف فيها نمو الملوثات ويبقى عددها ثابتاً.
4. فترة الموت Death Period وهي آخر فترة في حياة الملوثات، إذ يبدأ الطعام بالتلف والفساد ويصبح غير ملائم لنمو الكائنات العضوية الدقيقة مما يؤدي إلى موتها. ويبين الشكل (4-1) فترة الطور المتأخر وفترة النمو الأساسي وفترة الموت.

إذاً هنالك هدفان أساسيان في حفظ الأغذية هما الاحتفاظ بالغذاء في حالة استهلاكية جيدة والثاني هو الحفاظ على نوعية المنتج الغذائي من حيث المظهر والراحة والطعم والقيمة الغذائية، كما إن المواد الغذائية المطلوب حفظها يمكن أن تقسم إلى مجموعتين عند وقت الحفظ والتوزيع، الأولى مواد حية والثانية مواد ميتة، فالمجموعة الأولى مثل الفواكه والخضراوات يتم حفظها حية والعمل على التقليل من تأثير نشاط الإنزيمات لتقليل معدل نضجها، إما المجموعة الثانية (المواد الميتة) كاللحوم الحمراء ومنتجات الدواجن والأسماك، فإن تعرضها للتلف أكبر من المجموعة الأولى ولهذا فهي تحتاج لطرائق معالجة وحفظ أكثر دقة وصرامة.

شكل 4-1 فترات فساد المواد الغذائية

4-4 الطرائق القديمة لحفظ الأغذية

لقد كان حفظ الأغذية من المشكلات التي واجهت الإنسان لفترة طويلة. ولقد اكتشف الإنسان طرقاً متعددة، ومازالت تستخدم إلى يومنا هذا ومنها:

1. التجفيف الطبيعي Natural Drying

في هذه الطريقة يتم الاعتماد على إزالة الماء من المادة الغذائية، وتستخدم لحفظ بعض الخضراوات مثل الطماطم، الباميا، والباذنجان، حيث يتم تعريضها لأشعة الشمس للتجفيف ثم يتم حفظها في أماكن جافة لحين الاستخدام، فعند الحاجة لاستخدامها تغمر أولاً بالماء لإعادة طراوتها ثم تطبخ، وبما إن الأغذية تكون جافة لذا فإنها تكون وسطاً غير صالحاً لنمو الكائنات الدقيقة وبالتالي حماية الأغذية من التلف.

2. التمليح Salting

في هذه الطريقة يستخدم ملح الطعام من خلال إذابته بالماء. فيغلى الماء أولاً ويبرد ثم يضاف إليه الملح وبعدها يسكب المحلول الملحي على المواد الغذائية المطلوب حفظها ثم تترك. ويستخدم هذا النوع من الحفظ بشكل واسع للأجبان واللحوم، ويمكن أن يرش الملح بشكل مباشر على اللحوم وخاصة الأسماك، ويعتمد مبدأ استخدام الملح على أن تركيز الملح عالٍ جداً ويحتاج إلى ماء كي يخفف التركيز، فعند تواجد الكائنات الحية على الأطعمة المملحة فإن الملح سيقوم بسحب الماء من خلايا الكائنات الحية وبالتالي موت الكائنات وعدم فساد الطعام.

3. التخليل Pickling

تخلل المواد الغذائية بالماء والملح والخل وتضاف إليها بعض المواد مثل الثوم للحصول على النكهة. وتستخدم هذه الطريقة لحفظ الكثير من الخضراوات مثل الخيار، القرنبيط، الفلفل الأخضر، الزيتون وغيرها. ويبين الشكل (4-2) الطرائق القديمة لحفظ الأغذية.

شكل 4-2 الطرائق القديمة لحفظ الأغذية

4-5 الطرائق الحديثة لحفظ الأغذية

هناك الكثير من العيوب في الأغذية المحفوظة بالطرائق القديمة كالتغير في المظهر والطعم والرائحة وكذلك النقص في جودتها وقيمتها الغذائية. هذا فضلاً عن الحاجة المتزايدة للغذاء بأوقات وأماكن تختلف عن أوقات وأماكن الإنتاج، كما إن أغلب المواد الغذائية تكون موسمية ويتطلب حفظها

من موسمها إلى المواسم الأخرى، مما كان سبباً مباشراً للتفكير الجدي باستحداث طرائق جديدة لحفظ الأغذية بحالة جيدة ولفترات طويلة نسبياً. ومن الطرائق الحديثة لحفظ المواد الغذائية التجفيف، التعليب، التثليج، والتجميد.

1. التجفيف Drying or Dehydration

إن تخليص المادة الغذائية من الماء أو الرطوبة يساهم بشكل فعال بإيقاف نمو وتكاثر الإنزيمات والفيروسات والأحياء الدقيقة، مما يسهل عملية المحافظة على جودتها وقيمتها الغذائية لفترات زمنية طويلة. لقد تطورت صناعة التجفيف للمواد الغذائية بشكل ملحوظ في الفترة الأخيرة وقد دمجت مع التجميد لتصبح عملية التجميد والتجفيف Freeze- Drying. وهي طريقة يتم من خلالها فصل الماء عن المادة عندما تكون بحالة التجميد ثم بواسطة عملية التسامي تحت ضغط خوائي Vacuum. تتم العملية من خلال التجميد السريع ثم يتم تحويل السائل من حالته الصلبة إلى الحالة البخارية بإضافة الحرارة اللازمة للتسامي وسحب البخار من خلال مضخات خوائية.

2. التعليب Canning

يعتبر التعليب من أهم الطرائق المستخدمة لحفظ المواد الغذائية وأوسعها انتشاراً، التعليب هو عملية وضع المواد الغذائية في علب معدنية أو زجاجية تغلق بإحكام ثم تتم معاملتها بالحرارة العالية ولمدة زمنية محددة لقتل أو الحد من نشاط الأنزيمات والأحياء الدقيقة التي قد تكون سبباً لتلف وفساد المواد الغذائية. إن هذه الطريقة تعتمد على قتل الأحياء الدقيقة أولاً وبعدها ضمان عدم إعادة التلوث من خلال الحفظ في أوعية معقمة ومحكمة القفل، ونظراً لطبيعة المواد الغذائية من ناحية الاستهلاك وجوانب أخرى لا يمكن أن تعمم هذه الطريقة على جميع المواد الغذائية.

3. التثليج والتجميد Refrigeration and Freezing

تتم معاملة المواد الغذائية بدرجات حرارة منخفضة لمنع نمو ونشاط الكائنات الحية وكذلك إيقاف التفاعلات الأنزيمية التي تؤثر بشكل مباشر في خواص المواد الغذائية وتغير قيمتها الغذائية. والتثليج يُعد الطريقة الوحيدة لحفظ الأغذية بحالتها الطازجة (الأصلية)، ويختلف مقدار درجة الحرارة المنخفضة اللازمة للحفظ المناسب باختلاف المادة المخزونة والفترة الزمنية التي تحفظ فيها المادة في المخزن.

لقد تطورت عملية التثليج والتجميد للمواد الغذائية بشكل ملحوظ في السنوات الأخيرة على النطاق التجاري باستخدام غاز النيتروجين السائل الذي تصل درجة حرارته إلى (−186°C)، حيث يمكن تجميد بعض المواد الغذائية بسرعة كبيرة مع ضمان احتفاظها بقوامها الأصلي ودون التأثير على القيمة

الغذائية، ويمكن التنويه بعدم وجود طريقة محددة واحدة لحفظ الأغذية وإنما يكون حفظ الأغذية بواحدة من الطرائق المشار إليها أعلاه، اعتماداً على عدة عوامل منها نوع المنتج، مدة التخزين، الهدف من التخزين، سهولة توفير معدات التخزين والنقل من مكان إلى آخر.

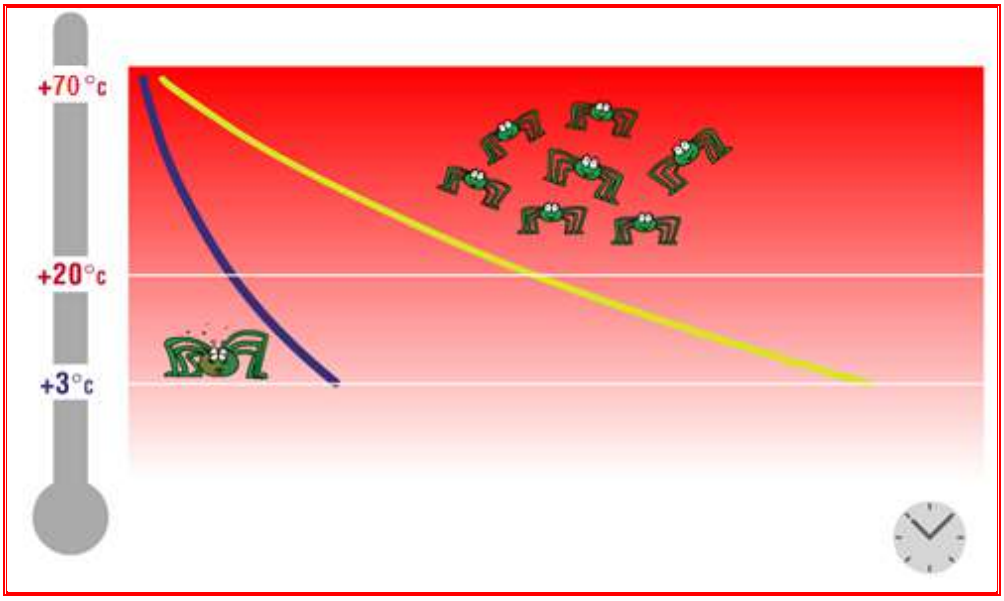
6-4 السيطرة على نمو وتكاثر الكائنات الدقيقة

تُعد درجة الحرارة والرطوبة النسبية وحركة الهواء، من أهم المتغيرات الواجب السيطرة عليها للحفاظ على المواد الغذائية من التلف وبالأخص المواد غير المغلفة. كما إن ظروف الحفظ المُثلى للمادة الغذائية تعتمد على نوعية المادة ومدة الحفظ المطلوبة. وتوضّح الجداول (4-1)، (4-2) و(4-3) ظروف الحفظ لبعض المواد الغذائية من خضراوات وفواكه ولحوم والمعتمدة من قبل الجمعية الأمريكية لمهندسي التدفئة والتثليج وتكييف الهواء (ASHRAE). ويمكن السيطرة على نمو هذه الكائنات عن طريق السيطرة على المتغيرات الآتية:

1. درجة الحرارة Temperature

وهي من العوامل المهمة في نمو وتكاثر الكائنات الدقيقة، حيث أن الجو الأمثل لنمو هذه الكائنات يتراوح من (20 إلى 60)°س، وتموت هذه الكائنات إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى ما فوق (70°C). ويُعد التبريد هو الوسيلة الناجحة للسيطرة على نمو هذه الكائنات والوصول إلى درجة حرارة مقدارها (4°C) هي الدرجة المثلى، وعند ارتفاع هذه الدرجة يزداد نشاط هذه الكائنات، ويبين الشكل (4-3) مخطط لدرجات الحرارة المؤثرة في نشاط الكائنات الحية في الطعام.

ويتضح من جداول ظروف الحفظ المشار إليها إن درجة الحرارة المثلى لحفظ معظم المنتجات الحية أعلى بمقدار بسيط من درجة انجماد تلك المواد، وإذا تم حفظها بدرجات حرارة مغايرة لتلك الموصى بها تتعرض بعض المواد المخزونة (الخضراوات والفواكه) لما يسمى بأمراض التخزين البارد فتصاب الحمضيات مثلاً بتآكل القشرة Rind Pitting إذا خُزنت عند درجة حرارة أقل من درجة حرارة تخزينها.



شكل 4-3 مخطط لدرجات الحرارة المؤثرة على نشاط الكائنات الحية في الطعام.

2. الرطوبة النسبية Relative Humidity

يجب تجنب الرطوبة العالية في المخازن المبردة، حيث أن تكثف بخار الماء على السطوح الداخلية للغرف المبردة والسقوف يساعد على نمو الأعفان واستقرارها في تراكيب الجدران والسقوف. فضلاً عن سقوط قطرات الماء على المنتج وإتلافه.

إن من أهم العوامل التي تؤدي لتلف المواد الغذائية هو فقدانها للرطوبة في أثناء فترة الحفظ، إذ تصاب بما يسمى جفاف السطح Desiccation، فإذا تعرضت الفواكه والخضراوات إلى هذه العملية، فإنها ستفقد جزءاً كبيراً من وزنها وقيمتها الغذائية، أما جفاف السطح في اللحوم والدواجن فيسبب تغير اللون والانكماش مع زيادة عملية الأكسدة داخل المادة الغذائية والتعجيل بسرعة تلفها.

إن متطلبات الرطوبة النسبية داخل غرف حفظ المواد الغذائية يجب أن تكون عالية، وكذلك سرعة حركة الهواء يجب أن تكون بطيئة. إن الرطوبة النسبية العالية مطلوبة لتجاوز عملية جفاف السطح ولكنها تكون عامل مساعد للنشاط الميكروبي، ولهذا يجب أن تتم عملية اختيار قيمة الرطوبة النسبية داخل غرف الحفظ بعناية، إذا أريد المحافظة على القيمة الغذائية والنوعية للمواد المخزونة.

جدول 4-1 ظروف الحفظ (التخزين) للحوم والأسماك

المنتج	درجة حرارة الحفظ (°C)	الرطوبة النسبية %	درجة التجميد (°C)	زمن الحفظ
لحم بقر طازج	0 إلى 1	88 إلى 92	2.7 .1	1 إلى 6 أسبوع

لحم بقر - كبد		0		90		1.7 .2	5 يوم
لحم عجل		0 إلى 1		90		2.7 .3	1 إلى 7 أسبوع
لحم بقر مجمد	.4	18 إلى - 23		90 إلى 95		2.7 .5	6 إلى 12 شهر
لحم ضان طازج		0		85 إلى 90		2.2 .6	5 إلى 12 يوم
لحم ضان مجمد	.7	18 إلى - 23		90 إلى 95		2.7 .8	8 إلى 12 شهر
لحوم دواجن طازجة		-2 إلى 0		85 إلى 90		2.8 .9	1 أسبوع
لحوم دواجن مجمدة	.10	18 إلى - 23		90 إلى 95		2.8 .11	8 إلى 12 شهر
سمك طازج	.12	1 إلى 1		95 إلى 100		2.8 .13	4 إلى 5 يوم
سمك مجمد	.14	18 إلى - 29		90 إلى 95		2.2 .15	6 إلى 12 شهر
محار	.16	18 إلى - 29		90 إلى 95		2.2 .17	12 يوم
روبيان	.18	1 إلى 1		95 إلى 100		2.2 .19	12 إلى 14 يوم

جدول 4-2 ظروف الحفظ (التخزين) للخضراوات

المنتج		درجة حرارة الحفظ (°C)		الرطوبة النسبية %		درجة التجميد (°C)	زمن الحفظ
فاصوليا		7 إلى 10		95 إلى 100	.1	0.7	7 إلى 10 يوم
جزر		0		98 إلى 100	.2	1.4	4 إلى 6 أسبوع
قرنبيط		0		95 إلى 100	.3	0.8	2 إلى 4 أسبوع
كرفس		0		95 إلى 100	.4	0.5	1 إلى 2 شهر
أذرة حلوة		0		95 إلى 100	.5	0.6	4 إلى 8 يوم
خيار		10		95 إلى 100	.6	0.5	10 إلى 14 يوم

باذنجان		7 إلى 10		90 إلى 95		0.8	.7		7 يوم
ثوم جاف		0		65 إلى 70		0.8	.8		6 إلى 7 شهر
لهانة		0		95		0.5	.9		3 إلى 4 أسبوع
كراث		0		95		0.7	.10		1 إلى 3 شهر
خس		0		95 إلى 100		0.2	.11		2 إلى 3 أسبوع
فطر		0		95		0.9	.12		3 إلى 4 يوم
بصل جاف		0		65 إلى 70		0.8	.13		1 إلى 8 شهر
بزاليا جافة		10		70		---			6 إلى 8 شهر
فلفل حلو		7 إلى 13		90 إلى 95		0.7	.14		2 إلى 3 أسبوع
بطاطس		7		90 إلى 95		0.7	.15		10 إلى 14 يوم
بطاطس حلوة		13 إلى 16		85 إلى 90		1.3	.16		4 إلى 6 شهر
قرع		31		85 إلى 90		0.8	.17		2 إلى 3 شهر
فجل		0		90 إلى 95		0.7	.18		3 إلى 4 أسبوع
سبانخ		0		90 إلى 98		0.3	.19		1 إلى 2 أسبوع
طماطم		5 إلى 7		90 إلى 95		0.5	.20		3 إلى 7 يوم

جدول 4-3 ظروف الحفظ (التخزين) للفواكه

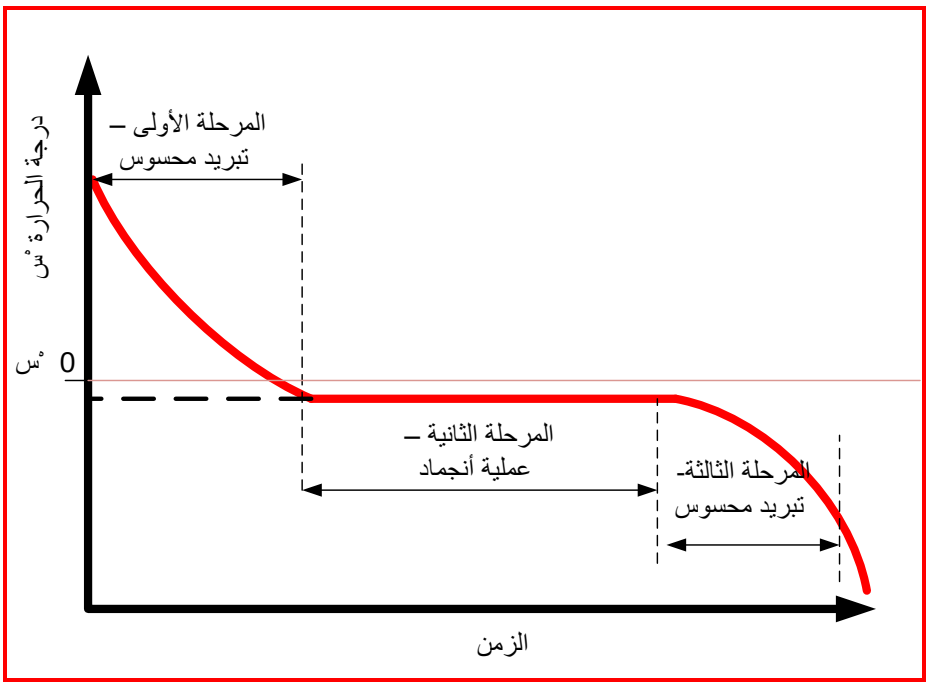
المنتج	درجة حرارة الحفظ (°C)	الرطوبة النسبية %	درجة التجميد (°C)	زمن الحفظ
التفاح	1 إلى 4	90 إلى 95	1.1 .1	3 إلى 8 شهر
المشمش	0	90 إلى 59	1.1 .2	1 إلى 2 أسبوع
الموز	--	85 إلى 95	0.8 .3	2 إلى 3 يوم
البطيخ	7 إلى 10	85 إلى 95	1.1 .4	4 إلى 6 أسبوع
جوز الهند	0 إلى 2	80 إلى 85	0.9 .5	1 إلى 2 شهر
الكرز	0 إلى -1	95	1.8 .6	2 إلى 3 أسبوع
التوت	2 إلى 4	90 إلى 95	0.9 .7	2- 4 أشهر
الزبيب	0 إلى 0.5-	90 إلى 95	1 .8	10 إلى 14 يوم
التمر	0 إلى – 18	75 أو اقل	16-	6 إلى 12 شهر
التين الجاف	0 إلى 4	50 إلى 60	-----	9 إلى 12 شهر
التين الطازج	1- إلى 0	85 إلى 90	2.4 .9	7 إلى 10 يوم
العنب	1- إلى 0	95 إلى 100	2 .10	3 إلى 6 شهر
العسل	7 إلى 10	90	0.9 .11	3 إلى 4 أسبوع
الليمون	9 إلى 10	85 إلى 90	1.4 .12	1 إلى 6 أسبوع
الزيتون	7 إلى 10	85 إلى 90	1.4 .13	4 إلى 6 أسبوع
البرتقال	5	85 إلى 90	1.4 .14	4 إلى 6 أسبوع
الكمثري	1.6- إلى 0	90 إلى 95	1.6 .15	2 إلى 6 شهر
الأناناس	7	85 إلى 90	1 .16	1 إلى 4 أسبوع
الخوخ	0.5- إلى 0	90 إلى 95	0.8 .17	1 إلى 4 أسبوع
الرمان	0	90	3 .18	2 إلى 4 شهر

الفراولة		0		90 إلى 100		.19 0.8		5 إلى 7 يوم	

7-4 تثليج وتجميد الأغذية Refrigeration and Freezing of Food

عند تثليج الأغذية عند درجات حرارة تتراوح من 1 إلى 4ْس فإن فترة الخزن تستمر لعدة أيام، أما عند درجات حرارة تتراوح من -18 إلى -35ْس فإن فترة الخزن تستمر عدة أسابيع إلى عدة أشهر من تاريخ تجميدها. وهنالك فرق كبير عند تجميد الأغذية بالتدريج (تجميد بطئ) وتجميدها بشكل مفاجئ (تجميد سريع)، حيث أن التجميد البطيء يكون بلورات ثلجية صغيرة داخل المنتج وتبدأ هذه البلورات بالنمو مع استمرار التجميد مما يؤدي إلى تمزيق جدران الخلايا النباتية وتهشيمها وذبولها وفقدانها للسوائل عند ذوبانها. أما التجميد السريع فإنه يكون البلورات الثلجية صغيرة الحجم والتي لا تؤدي إلى تلف الأنسجة.

إن تثليج وتجميد المواد الغذائية يعني إزالة حرارتها المحسوسة والكامنة، ويوضح الشكل (4-4) منحنى تغير درجة الحرارة مع الزمن خلال عملية تجميد مادة غذائية، حيث يلاحظ ثلاث مراحل تمر بها المادة المطلوب تجميدها. **المرحلة الأولى** هي عملية إزالة حرارة محسوسة من 20ْس إلى 0ْس (على فرض درجة التجميد 0ْس). **المرحلة الثانية** هي إزالة الحرارة الكامنة من المنتج عند الصفر السيليزي (مع ملاحظة إمكانية أن تكون درجة حرارة تجمد المادة الغذائية أقل من الصفر السيليزي). إما **المرحلة الثالثة** فهي إزالة الحرارة المحسوسة من المنتج المجمد وتسمى هذه المرحلة بعملية التجميد العميق Deep Freezing.



شكل 4-4 منحنى تغير درجة الحرارة مع الزمن خلال عملية تجميد مادة غذائية

4-7-1 التجميد البطيء Slow Freezing

تتكون البرادات الخاصة بالتجميد البطيء من غرف معزولة عزلاً حرارياً جيداً، وتعمل عند درجات حرارة تتراوح من -15°س إلى -40°س. ويتم تبادل الحرارة بين المنتج ومحيطه بواسطة الحمل الحر وليس الحمل القسري (أي أن حركة الهواء حول المنتج تكون حركة طبيعية وحرة). تتكون هذه المخازن من مبخرات على شكل رفوف يتم وضع الأغذية عليها وفي بعض الأحيان يستخدم حزاماً ناقلاً يمر فوق هذه المبخرات. تستخدم هذه البرادات في حفظ اللحوم والأسماك والعصائر وتتراوح فترة الخزن من 12 إلى 72 ساعة وحسب سعة البراد. ومن مساوئ هذه الطريقة زيادة الفضاء اللازم للكيلوغرام الواحد من المنتج وبالتالي زيادة حجم الحيز المستخدم للتجميد.

4-7-2 التجميد السريع Fast Freezing

إن المنتجات المجمدة بواسطة التجميد السريع بشكل عام تكون أفضل من تلك المنتجات المجمدة بواسطة التجميد البطيء، للأسباب الآتية:

1. فترة التجميد السريع أقصر من فترة التجميد البطيء، مما يقلل من زمن انتشار الأملاح داخل المنتج المجمد.
2. يبرد المنتج سريعا إلى درجة حرارة أوطأ من تلك التي يحدث عندها نمو الفطريات والخمائر، ولهذا يتم منع عملية التحلل في أثناء فترة التجميد.

3. إن حجم بلورات الجليد المتكونة خلال عملية التجميد السريع تكون أصغر بكثير من تلك المتكونة عند التجميد البطيء، كما إن تأثيرها في المنتج يكون أقل.

ويمكن تقسيم التجميد السريع إلى:

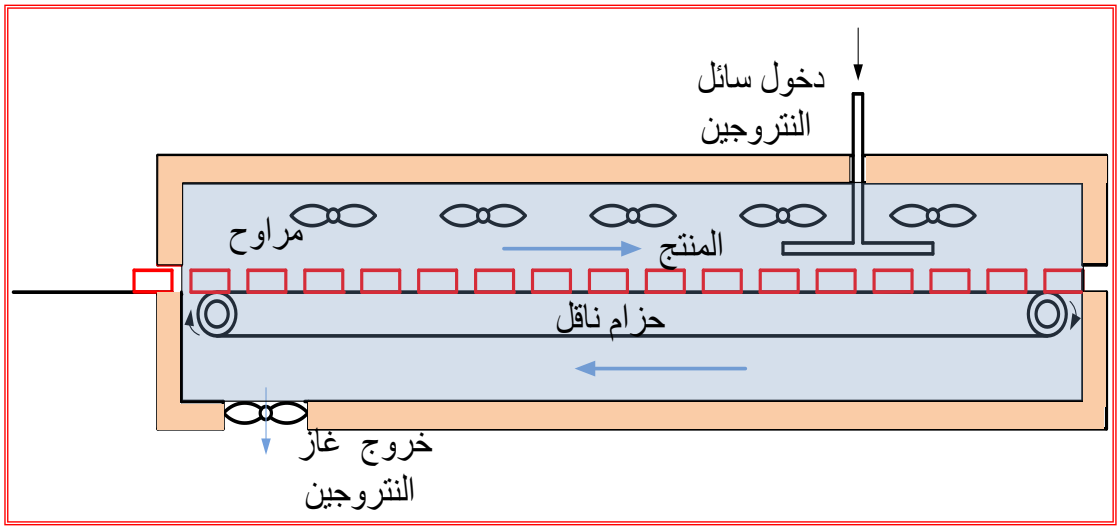
1. التجميد بالغمر Immersion Freezing

تستخدم هذه الطريقة للمنتجات المعلبة وغير المعلبة ولاختصار الوقت اللازم للانجماد، وتتم من خلال وضع المنتج في محلول مثلج مع استمرار ضخ المحلول المثلج أو تحريك المنتج داخل المحلول المثلج باستمرار حتى انجماده. وغالباً ما يكون المحلول الملحي هو من محاليل كلوريد الصوديوم أو محلول سكري أو محلول بروبلين كليكول. ومن مساوئ هذه الطريقة:

- فقدان قسم من أملاح المحلول الملحي بسبب تغلغلها في المنتج.
- فقدان قسم من المحلول الملحي بسبب التصاقه بالمنتج.
- يجب أن يكون المحلول الملحي غير سام.

لذلك فإن تغليف المنتج يكون ضرورياً لمنع التفاعل بينه والمحلول البارد، وقد يتم استخدم التجميد الزمهريري Cryogenic Freezers التي تعتمد على سوائل النيتروجين أو ثاني أوكسيد الكاربون، ذات درجات حرارة غليان منخفضة جداً وتكون بحدود (196°C−) للنيتروجين وحوالي (79°C−) لثاني أوكسيد الكاربون، إذ تتم الإفادة من الفرق الكبير بين درجات حرارة المنتج والسائل، لإعطاء معدلات انتقال حرارة عالية، مما يزيد من سرعة التجميد بشكل كبير، ومثال ذلك المركبات التي تستخدم كمجمدات، والشكلين (4-5 أ) و(4-5 ب) يوضحان عملية دخول وخروج المنتج ودخول سائل النيتروجين وخروج بخاره، ويجب الحذر من استخدام هذه السوائل في أثناء العمل حيث أنها يمكن أن تسبب حروق خطرة (حروق التجميد)، وكما مبين في الشكل (4-6).

شكل 4-5 أ منظومة تجميد بالغمر



شكل 4-5 ب مخطط لمنظومة تجميد بالغمر

شكل 4-6 الحروق الناتجة عن استخدام النتروجين السائل

2. التجميد بالهواء الصاعق Air- Blast Freezing

لأغراض تجميد المواد الغذائية يستخدم الهواء المتحرك بسرعات عالية ودرجات حرارة منخفضة، لتسريع عملية انتقال الحرارة من المنتج الغذائي المطلوب تجميده. وتستخدم هذه الطريقة للمواد الغذائية غير منتظمة الشكل والحجم مثل الدواجن المغلفة. **وهنالك تصاميم مختلفة لتحقيق الهدف أعلاه منها:**

1. التجميد باستخدام غرف الهواء الصاعق وأنفاق التجميد

Air Blast Room & Tunnel Freezers

يستعمل في هاتين الطريقتين الهواء البارد ويتم تدويره في المخازن المجمدة بواسطة مراوح خاصة بحيث يمر على مبخرات كبيرة موزعة بانتظام في المخزن المجمد، وبعد ذلك يُعاد سحب الهواء مرة أخرى ليعاد تمريره خلال غرفة التجميد ويبين الشكل (4-7)غرف تجميد باستعمال الهواء الصاعق، في حين أن الشكل (4-8) يبين أنفاق تجميد باستعمال الهواء الصاعق، إن ترك مسافات مناسبة بين حاويات المنتجات الغذائية، يكون ضرورياً للسماح للهواء البارد بالمرور على جميع أجزاء المنتج والتجمد بوقت واحد، وبعد التجمد يسحب المنتج من مكانه ويحل مكانه منتج جديد، وهكذا تتم عملية التجميد على دفعات.

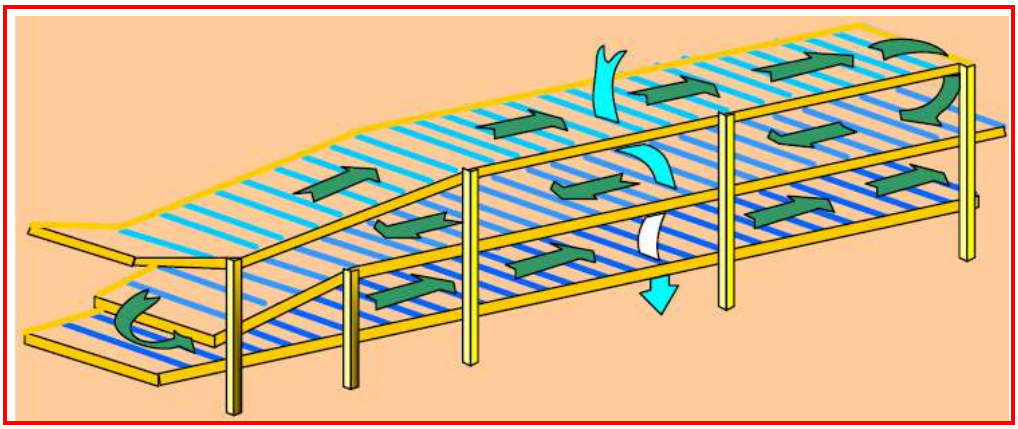
شكل 4-7 التجميد بغرف الهواء الصاعق

شكل 4-8 التجميد بأنفاق الهواء الصاعق

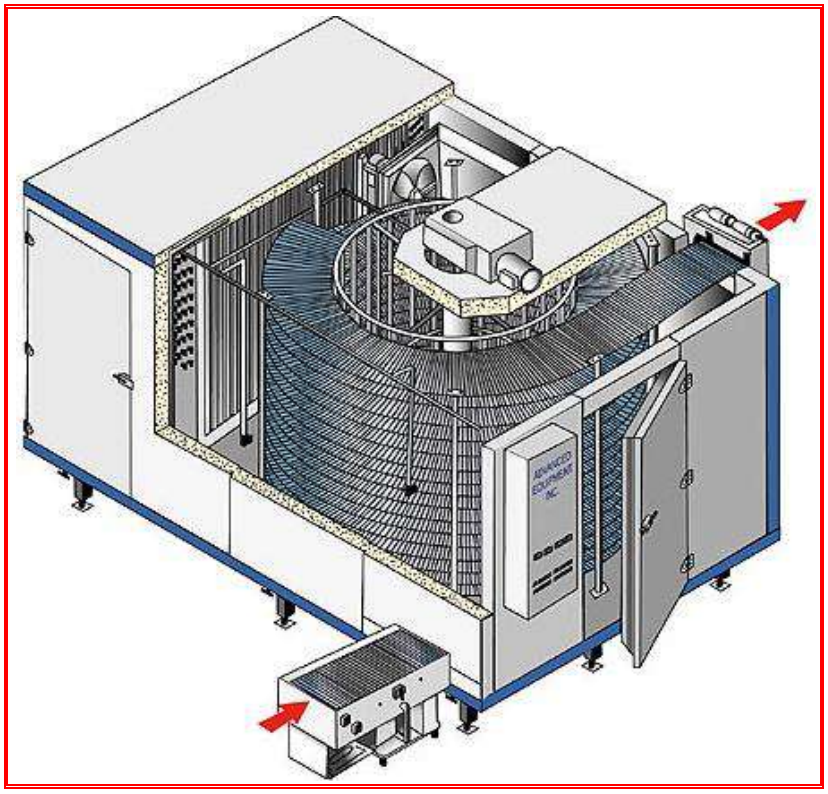
2. التجميد باستخدام السيور المتحركة Air Blast Belts Freezers

يمرر الهواء البارد على المنتجات الغذائية المحمولة على سيور متحركة بصورة أفقية كما موضح بالشكل (4-9)، حيث تتطلب أن تكون حركة الهواء بشكل متعامد مع حركة السير لضمان تعرض أكبر مساحة من المنتج للهواء، أو تمرر المنتجات الغذائية على سيور متحركة

حلزونية والتي يمر عليها الهواء من الأسفل للأعلى أو بشكل أفقي لزيادة مساحة التماس بين الهواء والمنتج المجمد، وكما مبين في الشكل (4-10).



شكل 4-9 التجميد باستخدام السيور الأفقية المتحركة



شكل 4-10 التجميد باستخدام السيور الحلزونية المتحركة

3. التجميد بالتلامس Contact Freezing

تعتمد هذه الطريقة التلامس المباشر Direct أو غير المباشر Indirect بين السطوح المبردة إلى درجات حرارة منخفضة والمواد الغذائية المطلوب تجميدها. في حالة التلامس المباشر ومن أجل الحصول على كفاءة تبريد عالية، يجب ضمان التلامس الجيد بين المادة الغذائية والسطح المبرد. وتستخدم هذه الطريقة غالباً للمنتجات الغذائية المعلبة وكذلك المنتجات ذات الأشكال الهندسية المنتظمة. ويوضح الشكل (4-11) إحدى طرائق التجميد بالتلامس بين الأسطح المبردة والمنتج الغذائي.

شكل 4-11 التجميد بالتلامس

إما التجميد بالتماس غير المباشر Indirect Contact Freezing، فيكون من خلال رفوف مجوفة يمر خلالها سائل الأمونيا أو محلول ملحي مثلج، ويوضع المنتج فوقها ليتم خفض درجة حرارته. أو من خلال رفوف يمكن رفعها وخفضها حسب الحاجة، ويتم تحميل الرفوف من الأول إلى الأخير ويكون التفريغ عكس التحميل (أي من الأخير إلى الأول) وتستخدم رافعات هيدروليكية لرفع الرفوف وخفضها.

أسئلة الفصل الرابع

س1: عرّف ما يأتي:

حفظ الأغذية، التمليح، التخليل، التجفيف، التعليب، أمراض التخزين البارد، جفاف السطح، التجميد الزمهريري.

س2: عدد:

1. طرائق حفظ الأغذية القديمة والحديثة.
2. المتغيرات التي من خلالها يمكن أن تتم السيطرة على نمو وتكاثر الكائنات الدقيقة.
3. المراحل التي تمر بها المادة الغذائية المطلوب تجميدها.
4. طرائق تثليج وتجميد المواد الغذائية.
5. الفروقات بين التجميد البطيء والتجميد السريع.
6. مساوئ طريقة التجميد بالغمر.

س3:علل ما يأتي:

1. استخدام الطرائق الحديثة لحفظ الأغذية.
2. استخدام التثليج لحفظ الأغذية.
3. تلف المواد الغذائية.
4. لا توجد طريقة واحدة محددة لحفظ الأغذية.
5. أفضلية المواد المجمدة سريعاً على تلك المجمدة بطيئاً.
6. تغليف المواد الغذائية المجمدة بالغمر.

س4: ناقش تأثير الرطوبة في خزن المواد الغذائية.

الفصل الخامس
منظومات التكييف
Air-Conditioning Systems

منظومات التكييف Air-Conditioning Systems

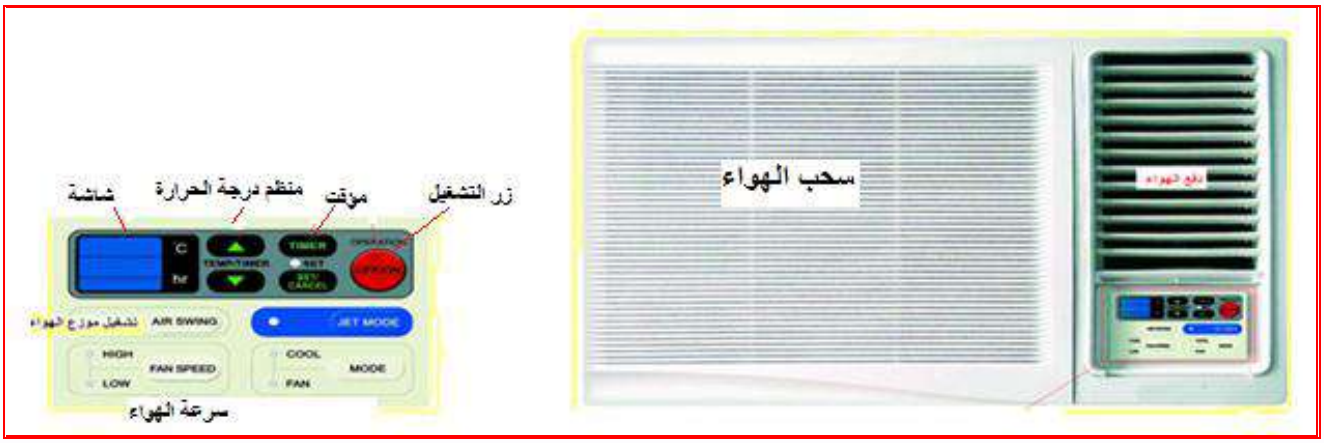
1-5 مقدمة Introduction

مفهوم تكييف الهواء العام هو القدرة على التحكم في خواص الهواء الفيزيائية والكيمياوية من أجل توفير ظروف ملائمة لاحد أمرين احدهما تكييف الهواء لراحة البشر والآخر تكييف الهواء للصناعة بأنواعها. أن عملية تكييف الهواء للراحة هي معاملة الهواء والسيطرة المتزامنة على درجة حرارته ورطوبته ونقاوته وطريقة توزيعه لموافاة متطلبات الراحة لشاغلي الحيز المكيف.

في هذا الفصل سيتم تناول بعض أهم أنواع منظومات تكييف الهواء.

2-5 مكيف الهواء الجداري Window Type Air-Conditioner

يُعد المكيف الجداري من أجهزة التكييف شائعة الاستعمال، بسبب رخص ثمنه نسبياً، وسهولة نصبه وصيانته، ويتوافر بسعات تتراوح اعتيادياً من 4000 وحدة حرارة بريطانية بالساعة (Btuh)، أي ما يعادل $\frac{1}{3}$ طن تثليج إلى (24000 Btuh) أي ما يعادل (2 TR) أو أكثر بقليل، ويبين الشكل (5-1) مكيف هواء جداري.



شكل 5-1 مكيف هواء جداري

1-2-5 أجزاء مكيف الهواء الجداري

يتكون مكيف الهواء الجداري بصورة عامة من الأجزاء الآتية:

1- الضاغط Compressor: وهو الجزء الرئيس في المكيف، ويستعمل لضغط بخار مائع التثليج، ويكون إما ترددياً، أو من النوع الدوار، ويستعمل الضاغط الدوار بكثرة في الأجواء المعتدلة التي لا تزيد فيها درجة حرارة المحيط الخارجي على 35°C، ويستهلك الضاغط الدوار طاقة كهربائية أقل من الضاغط الترددي. في حين أن الضاغط الترددي يكون مناسباً في الأجواء الحارة التي تصل فيها درجة حرارة المحيط الخارجي إلى 50°C.

2- المكثف Condenser : وهو عبارة عن مبادل حراري، يتكون من أنابيب نحاسية تحتوي على زعانف عادة تصنع من الألمنيوم مثبتة على أنابيب النحاس، وهو من النوع المبرد بالهواء، ويبرد عن طريق مروحة تقوم بدفع الهواء خلال المكثف.

3- المبخر Evaporator : وهو مبادل حراري أيضاً ويحتوي على أنابيب نحاسية ذات زعانف مصنوعة من الألمنيوم، وتقوم المروحة بسحب الهواء من خلال المبخر ودفعه من خلال شباك صغير بجانب المبخر.

4- أداة التمدد Expansion Device: وظيفة أداة التمدد هي خفض ضغط سائل مائع التثليج من ضغط المكثف إلى ضغط المبخر، ويستعمل الأنبوب الشعري عادة كأداة تمدد، إلا أن بعض المكيفات الجدارية يمكن أن تستخدم صمام التمدد لهذا الغرض.

5- منظم درجة الحرارة Thermostat : ويستخدم للسيطرة على درجة الحرارة داخل الغرفة، ويتكون من مفتاح كهربائي تتم السيطرة عليه بواسطة أنبوب شعري توضع نهايته على جهة المبخر.

6- المحرك الكهربائي Electrical Motor: يستعمل محرك كهربائي ذو محورين لتدوير كل من مروحتي المكثف والمبخر، وتربط مروحة طرد مركزي Centrifugal Fan على جهة المبخر في حين أن المروحة المستعملة لتبريد المكثف تكون من النوع المحوري.

7- المجفف Dryer: وهو عبارة عن أنبوب نحاسي يحتوي على مادة مازة للرطوبة تسمى بالسليكاجل، وتكون بصورة حبيبات. وتستعمل شبكتا نحاس لغرض احتواء المادة المازة خلال المجفف. ويوضع المجفف بعد المكثف لامتزاز أية رطوبة قد تكون موجودة في سائل مائع التثليج.

8- وعاء الاستلام Receiver: وهو عبارة عن خزان يوضع بعد المكثف الغرض منه تجميع مائع التثليج بحالته السائلة، مما يؤدي إلى ضمان مرور مائع التثليج بحالة سائلة فقط إلى الأنبوب الشعري.

9- مرشح الهواء Air Filter: يوضع قبل المبخر بطريق الهواء، وفائدته ترشيح الهواء قبل دخوله إلى المبخر، ويصنع من نسيج بلاستيكي سهل التنظيف.

10- وسيلة التحكم عن بعد Remote Control : تحتوي الأجهزة الحديثة على جهاز للسيطرة على عمل المكيف عن بعد، ويتم ذلك عن طريق لوحة إلكترونية مثبتة على المكيف، وتحتوي على عدسة تقوم بتسلم الأشعة تحت الحمراء الآتية من المرسلة في جهاز التحكم عن بعد، ومن خلال الإشارات المنبعثة من جهاز التحكم عن بعد تتم السيطرة على تشغيل الجهاز وإطفائه فضلاً عن التحكم بدرجة حرارة الهواء الخارج من المكيف.

11- الجدار الفاصل Separated Wall: ويستعمل لفصل وحدة التكثيف (الضاغط والمكثف) عن أجزاء وحدة التبخير (المبخر والأنبوب الشعري ومروحة المبخر)، ويستعمل هذا الجدار لمنع اختلاط الهواء المكيف مع الهواء الخارجي المستعمل لتبريد المكثف، فضلاً عن عزل الضوضاء الناتجة عن عمل الضاغط، ويحتوي الجدار الفاصل على بوابة صغيرة تعمل على تزويد الغرفة المكيفة بجزء من الهواء الخارجي للتهوية، ويتم التحكم بهذه البوابة يدوياً.

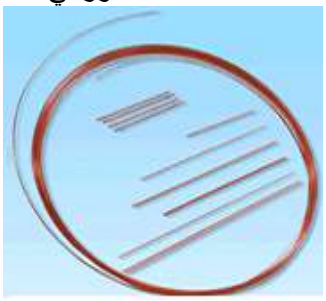
ويبين الشكل (5-2) أجزاء مكيف الهواء الجداري في حين يبين الشكل (5-3) وصف مكيف الهواء الجداري.

1- ضاغط ترددي

1-ضاغط دوراني

2- مكثف

3- مبخر



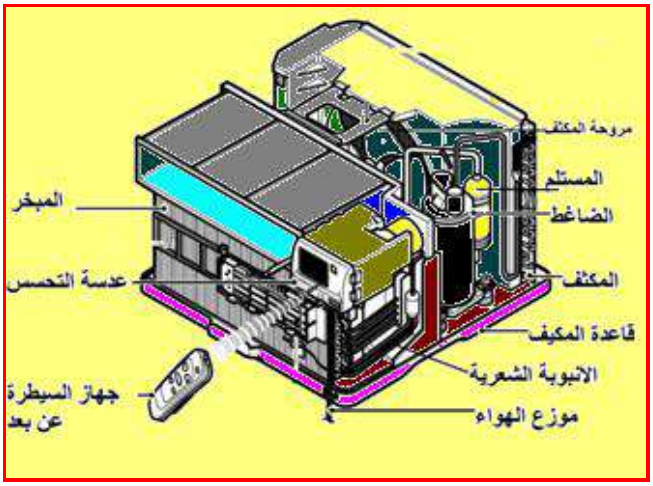
4- أنبوب شعري

5- منظم درجة الحرارة

6- المحرك الكهربائي

7- وعاء الاستلام

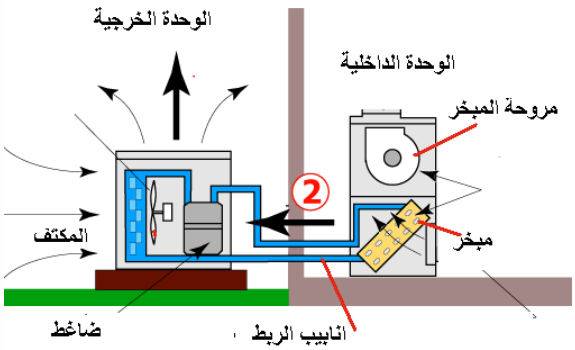
شكل 5-2 أجزاء مكيف الهواء الجداري



شكل 5-3 وصف المكيف الجداري

3-5 مكيف الهواء المنفصل Split Air- Conditioner

تسمى المكيفات بالمكيفات المنفصلة إذا تم عزل وحدة التكثيف، (الضاغط والمكثف وأداة التمدد)، عن وحدة التبخير، وفي هذا النوع من المكيفات يتم وضع منظومة التكثيف خارج الغرفة، وتسمى بالوحدة الخارجية. في حين أن الجزء الذي يحتوي على المبخر ومروحة المبخر داخل الغرفة، وتسمى بالوحدة الداخلية، ويبين الشكل (5-4) المكيف المنفصل بوحدتيه الداخلية والخارجية.



شكل 5-4 مكيف الهواء المنفصل بوحدتيه الداخلية والخارجية

1-3-5 أنواع المكيفات المنفصلة تقسم المكيفات المنفصلة حسب وضعية الوحدة الداخلية كما يأتي:

- النوع السقفي: إذ تركب الوحدة الداخلية في سقف الغرفة، كما مبين في الشكل (5-5 أ)
- النوع الجداري: وفيه يتم تثبيت الوحدة الداخلية في الثلث العلوي من جدار الغرفة، كما مبين في الشكل (5-5 ب).
- النوع الأرضي: وفيه توضع الوحدة الداخلية على الأرض وملاصقة لأحد جدران الغرفة، كما مبين في الشكل (5-5 ج).

2-3-5 أجزاء مكيف الهواء المنفصل

يتكون المكيف المنفصل من وحدتين داخلية وخارجية، وكما يأتي:

أ- الوحدة الداخلية Indoor Unit:

1- المبخر Evaporator: ويتكون من شبكة مصنوعة من أنابيب النحاس أو الألمنيوم وتحتوي الأنابيب على زعانف مصنوعة من الألمنيوم، وتتميز مبخرات الوحدات المنفصلة بصغر حجمها وكفاءة نقل الحرارة العالية.

أ- مكيف هواء منفصل سقفي

ب – مكيف هواء منفصل جداري

ج- مكيف هواء منفصل ارضي قائم

شكل 5-5 أنواع المكيفات الجدارية المنفصلة

2- **مروحة المبخر**: تعمل مروحة المبخر على سحب الهواء من الغرفة ليمر عبر مرشح الهواء ثم عبر المبخر، وبعد ذلك يدفع الهواء المكيف إلى الغرفة بواسطة المروحة، كما هو مبين في الشكل (5-6). وتزود مروحة المبخر بمحرك كهربائي متعدد السرع، وذلك للتحكم بحجم الهواء المدفوع عبر المبخر

3- **مرشح الهواء Filter**: تزود جميع الوحدات الداخلية بمرشح للهواء يعمل على تنقية الهواء قبل دخوله إلى المبخر، ويتكون المرشح من نسيج قطني أو من البلاستك يسهل نزعه وغسله. وفي الوقت الحاضر تطورت المرشحات كثيراً لتوفر متطلبات إضافية للتخلص من جميع عوالق الهواء من روائح والبكتريا والفايروسات المسببة للأمراض وحبوب اللقاح (الطلع).

4- **موجهات الهواء Vanes** : وتعمل الموجهات على توزيع الهواء بصورة منتظمة في الغرفة عن طريق حركتها المستمرة، ويمكن تثبيت هذه الموجهات على اتجاه واحد.

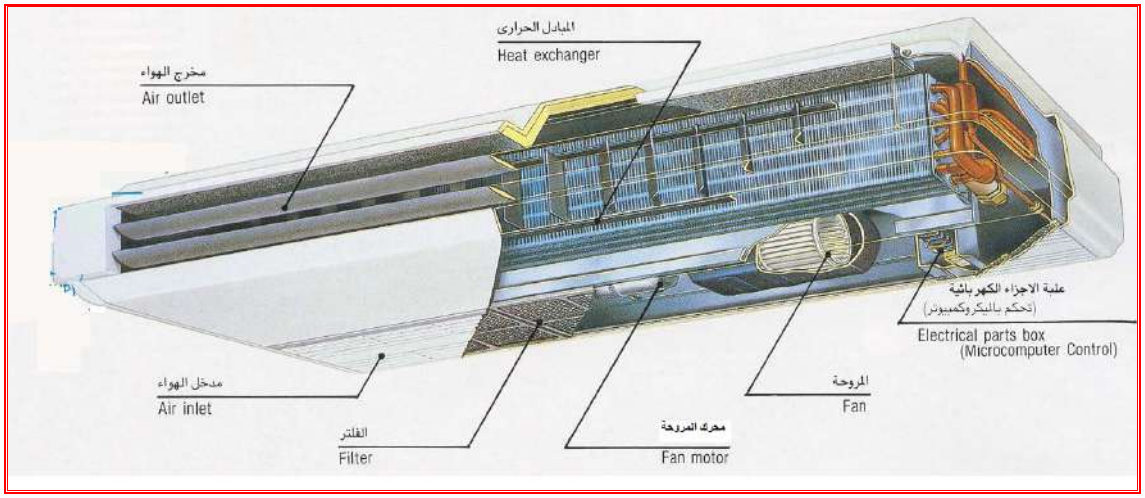
5- **لوحة السيطرة الإلكترونية Electronic Control Board**: تحتوى وحدات التكييف المنفصلة الحديثة على لوحة إلكترونية، يتم عن طريقها التحكم بعمل المكيف المنفصل والسيطرة على درجة الحرارة وسرعة الهواء، فضلاً عن مؤقت زمني يتم من خلاله التحكم بزمن تشغيل المكيف وإطفائه. ويستعمل جهاز التحكم عن بعد في السيطرة على عمل المكيف.

6- **ملف التدفئة الكهربائي Electrical Heater**: تحتوي بعض المكيفات المنفصلة على ملفات تدفئة كهربائية لغرض استعمال المكيف في التدفئة.

7- **حوض تجمع الماء المتكثف Drain Pan** : لغرض طرح بخار الماء المتكثف على المبخر إلى الخارج، يوضع حوض الماء أسفل المبخر، ويتصل الحوض بأنبوب بلاستيكي يعمل على طرح الماء المتكثف إلى خارج الغرفة.

8- **أداة التمدد Expansion Device**: تحتوي معظم الوحدات الداخلية على أداة التمدد، وغالباً ما يكون أنبوباً شعرياً. وفي الأنواع الحديثة تكون أداة التمدد داخل الوحدة الخارجية لتقليل الأصوات في الوحدة الداخلية.

ويبين الشكل (5-6) أجزاء وحدة التكييف الداخلية.



شكل 5-6 أجزاء وحدة التكييف الداخلية

ب - الوحدة الخارجية Outdoor Unit : تتكون الوحدة الخارجية من الأجزاء الآتية:

1- الضاغط Compressor: يكون الضاغط في وحدات التكييف المنفصل إما ترددياً أو دواراً وكما تم الذكر في مكيفات الهواء الجدارية، وقد تحتوي الوحدة الخارجية على أكثر من ضاغط إذا استعملت لتجهيز أكثر من وحدة داخلية.

2- المكثف Condenser : تستعمل شبكة من الأنابيب مصنوعة من النحاس أو الألمنيوم، ويتم زيادة سطح التكثيف عن طريق عمل عدة انحناءات في شبكة المكثف. فضلاً عن وجود الزعانف من الألمُنيوم على الأنابيب.

3- مروحة المكثف Condenser Fan: تستعمل مروحة محورية في الوحدات الخارجية، وتعمل المروحة على سحب الهواء من الخارج وإمراره خلال المكثف ودفعه من الجهة الأخرى، وتستعمل المراوح ذات الأقطار الكبيرة لضمان دفع أكبر كمية من الهواء بأقل ضوضاء. ويبين الشكل (5-7) بعض أجزاء الوحدة الخارجية.

شكل 5-7 الوحدة الخارجية لمكيف الهواء المنفصل

4-5 أنظمة تكييف الهواء المركزي Central Air-Conditioning Systems

يوجد نظام التكييف المركزي في البناية وبعيداً عن الأنظار، ويوضع إما خارج البناية وإما على سطحها وإما في غرفة مكائن خاصة لهذا الغرض. ويقسم نظام التكييف المركزي على قسمين، هما:

5-4-1 نظام التكييف المركزي باستخدام الوحدات المجمعة Packaged Units

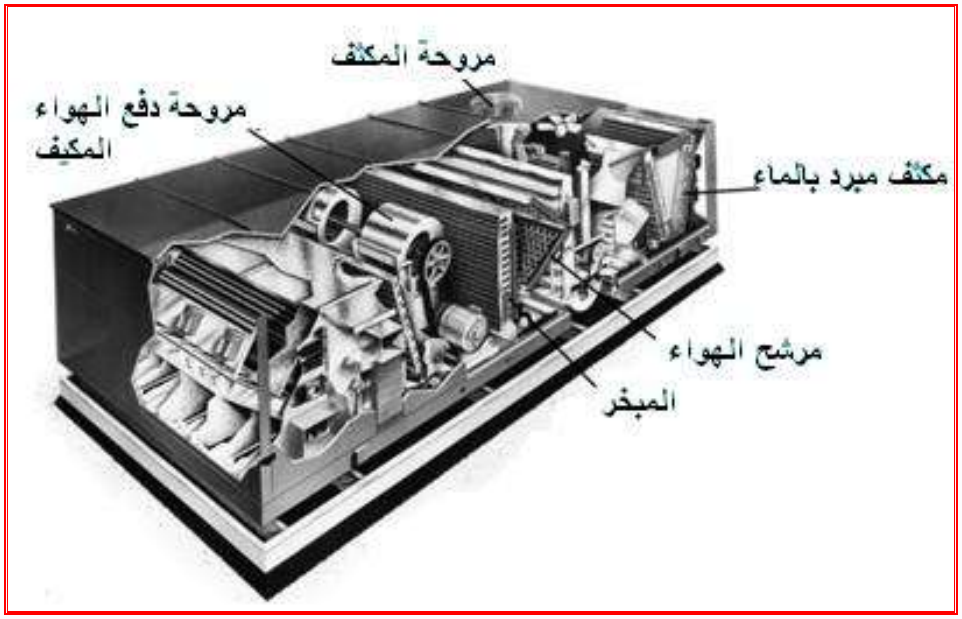
ويسمى أيضاً بنظام الهواء الكلي **All Air System** إذ يستعمل الهواء فحسب لنقل الحرارة من الحيز المراد تكييفه، وتستعمل الوحدات المجمعة لهذا الغرض، وتقسم الوحدات المجمعة على نوعين بحسب طريقة تبريد المكثف كما يأتي:

5-4-1-1 وحدات التكييف المجمعة المبردة بالهواء Air-Cooled Packaged Units

وتشتمل على الضاغط والمبخر وأداة التمدد، ومكثف مبرد بالهواء، وتستعمل غالباً في المطاعم والمخازن والمصارف والصالات وأحياناً في المنازل، وتمتاز بعدم حاجتها إلى ملحقات إضافية.

5-4-1-2 وحدات التكييف المجمعة المبردة بالماء Water-Cooled Packaged Units

وتختلف عن سابقتها بأن المكثف فيها يتم تبريده بواسطة الماء، وتستعمل في المؤسسات التجارية، والمطاعم، والوحدات السكنية، وتمتاز بكفاءة عالية للمكثف إذ إن الماء له القابلية على امتصاص الحرارة أكثر من الهواء، وتحتاج إلى ملحقات إضافية مثل برج التبريد ومضخات ماء وشبكات أنابيب وغيرها، ويبين الشكل (5-8) وحدة تكييف مجمعة يبرد مكثفها بالماء.



شكل 5-8 وحدة تكييف مجمعة مبردة بالماء

وتتكون الوحدات المجمعة بصورة عامة من الآتي:

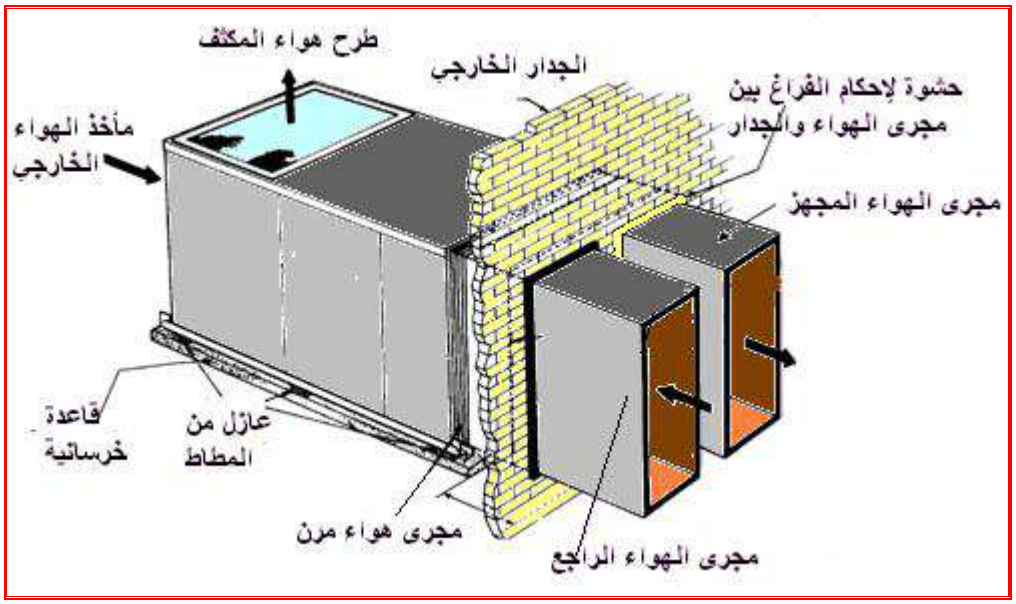
أولاً: جهة التثليج وتشتمل على:

- **الضاغط Compressor**: ويكون عادة من النوع الترددي المغلق أو نصف المفتوح.
- **المكثف Condenser**: ويكون من النوع المزعنف إذا كان المكثف مبرداً بالهواء، أو من نوع الأسطوانة والأنابيب إذا كان المكثف مبرداً بالماء.
- **أداة التمدد Expansion Device**: يستعمل عادة في الوحدات المجمعة صمام التمدد الحراري (Thermostat Expansion Valve).
- **المبخر Evaporator** : ويكون من النوع المزعنف ويقوم بتبريد الهواء المجهز إلى الغرفة.

ثانياً: جهة الهواء Air side

- **مأخذ الهواء الخارجي Fresh Air Intake**: وهي الفتحة التي يتم بواسطتها سحب الهواء الخارجي، وتتكون من شبكة معدنية لمنع دخول المواد الغريبة، وخانق هواء للتحكم بكمية الهواء المسحوبة.
- **ملف التسخين المسبق Pre-Heater** وهو جزء من أجزاء إزالة الرطوبة الزائدة من الهواء، ويستعمل لتسخين الهواء تسخيناً مسبقاً لتهيئته لعملية إزالة الرطوبة، وتتم السيطرة عليه عن طريق منظم إزالة الرطوبة.
- **مأخذ الهواء الراجع Return Air Intake**: ويتم عن طريقه إعادة جزء من الهواء الراجع من الفضاء المكيف، ويتم خلطه مع الهواء النقي في صندوق الخلط، ويتم التحكم بكمية الهواء الراجع عن طريق خانقات للهواء.
- **المرشح Filter**: ويوضع قبل المبخر لتنقية الهواء من الأتربة لمنع التصاقها بملف التبريد من جهة، ومن جهة أخرى لضمان تجهيز هواء نقي إلى الغرفة.
- **وحدة إزالة الرطوبة Dehumidifier**: يستعمل ملف التبريد لغرضين، أحدهما تبريد الهواء إلى درجة الحرارة المطلوبة، والآخر هو إزالة الرطوبة من الهواء إلى الحد الذي يحقق راحة الإنسان.
- **وحدة الترطيب Humidifier**: يستعمل لإضافة رطوبة إلى الهواء المجهز بما يحقق راحة الإنسان في الشتاء، وتتم عملية إضافة الرطوبة إلى الهواء إما عن طريق حقن الماء بصورة رذاذ، وإما عن طريق ضخ بخار الماء.
- **المروحة Fan**: تستعمل مروحة الطرد المركزي عادة في تجهيز الهواء إلى الغرفة، إذ تمتاز مراوح الطرد المركزي بتوفير ضغط عالٍ للهواء المجهز بما يتيح له السريان في مجاري الهواء وفتحات تجهيز الهواء.
- **شبكة مجاري الهواء Ducting Systems**: وتحتوي على مجاري الهواء بجميع أنواعها فضلاً عن شبابيك وناشرات الهواء، والهدف منها إيصال الهواء المكيف إلى الفضاءات المراد تكييفها.

ويبين الشكل (5-9) وحدة تبريد مجمعة وكيفية نصبها بالخارج.



شكل 5-9 وحدة تكييف مجمعة ويبين فيها طريقة النصب

ثالثا: جهة التدفئة Heating Side

ملف التسخين: ويستعمل لرفع درجة حرارة الهواء المكيف بما يلائم راحة الإنسان شتاءً أو إذا دعت الحاجة إلى ذلك، ويكون ملف التسخين كهربائياً.

رابعا: جهة الماء Water Side

وتشمل هذه الفقرة وحدات التكييف المجمعة المبرد مكثفها بالماء، وتشمل ما يأتي:

- **مضخات الماء Water Pumps**: تستعمل مضخات الطرد المركزي لغرض سحب الماء من أبراج التبريد Cooling Towers ودفعه إلى المكثفات المبردة بالماء.
- **أبراج التبريد Cooling Towers** تقوم أبراج التبريد بتبريد الماء الساخن الخارج من المكثف لإعادة استعماله مرة ثانية في تبريد المكثف.
- **شبكة أنابيب الماء Water Piping System**: وهي الشبكة المسؤولة عن ربط المكثف المبرد بالماء ببرج التبريد عبر المضخات، وتشمل على صمامات وأجهزة سيطرة أخرى.

2-4-5 نظام التكييف المركزي باستخدام مثلجات الماء Water Chillers

يحتوي هذا النظام على مثلجات ماء، ومثلجات الماء تتكون من وحدة تثليج ذات مبخرات من نوع الأسطوانة والأنابيب، إذ يمر مائع التثليج في الأسطوانة في حين يمر الماء داخل الأنابيب، كما هو مبين في الشكل (5-10)، وتقوم مثلجات الماء بخفض درجة حرارة الماء إلى درجة حرارة تتراوح من 5 إلى 6°C، يدفع الماء المثلج إلى وحدات ثانوية مثل دافعات هواء Air Handling Units أو وحدات مروحة وملف Fan Coil Units، وعلى هذا الأساس يحتوي هذا النوع من أنظمة التكييف على مثلجات الماء، وتقسم مثلجات الماء على قسمين هما حسب أنواع الضاغطات المستعملة كما يأتي:

- **مثلجات ماء ذات ضواغط ترددية Reciprocating Compressors Water Chiller**

تتراوح سعة مثلجات الماء ذات الضواغط الترددية بين 80 إلى 200 طن تثليج، وتكون الضواغط إما من النوع المفتوح وإما من النوع نصف المفتوح، وتكون مكثفاتها مبردة بالماء عادة، إلا في حالة مثلجات الماء ذات السعات الصغيرة إذ يمكن أن يبرد المكثف بالهواء.

- **مثلجات ماء ذات ضواغط طرد مركزي Centrifugal Compressors Water Chiller**

يستعمل هذا النوع في مثلجات الماء ذات السعات العالية التي تتراوح من 200 إلى 750 طن تثليج أو أكثر، حيث يستعمل ضاغط الطرد المركزي قوة الطرد المركزي في رفع ضغط بخار مائع التثليج، وتستعمل موائع التثليج ذات درجات الغليان العالية، إذ كان يستعمل R-11، وبسبب تأثيره السيء على طبقة الأوزون استعيض عنه بمائع التثليج R-23 الصديق لطبقة الأوزون، لأن جهده في نفاذ طبقة الأوزون يساوي صفراً وجهده في الاحترار العالمي ضئيل.

شكل 5-10 مبخرات مثلجات الماء نوع الأسطوانة والأنابيب

يقسم نظام التكييف المركزي باستعمال مثلجات الماء على قسمين، هما:

5-2-4-1 نظام وحدات دفع الهواء Air Handling Units

تتكون وحدة دفع الهواء كما في الوحدات المجمعة من عدد من الأجزاء، والاختلاف الوحيد بينهما هو إن وحدات دفع الهواء لا تحتوي على وحدة تثليج أو مبخر، وإنما تحتوي على ملف يستقبل الماء المثلج الذي تم تبريده بواسطة مثلجات الهواء. ويمكن تقسيم وحدات دفع الهواء على عدة أجزاء كما يأتي:

أولا: أجزاء جانب الهواء (Air Side) وتقسم على:

- مأخذ الهواء الخارجي Fresh Air Intake
- ملف التسخين المسبق Preheated
- مأخذ الهواء الراجع Return Air Intake
- المرشح Filter
- وحدة إزالة الرطوبة Dehumidifier
- وحدة الترطيب Humidifier
- المروحة Fan
- شبكة مجاري الهواء Ducting System

ثانيا: جهة التبريد Cooling Side: وتشتمل على ملف التبريد الذي يتسلم الماء المثلج من مثلجات الماء.

ثالثا: أجزاء جانب جهة الماء Water Side: وتستعمل إذا كانت المنظومة تستعمل الماء المثلج في تبريد الهواء في المنظومات ذات المكثفات المبردة بالماء، وكذلك المنظومات التي تستعمل الماء الساخن أو البخار في تسخين ملفات التسخين، وتشتمل جهة الماء على:

1. **مضخات الماء Water Pumps**

تستعمل مضخات ماء من نوع (مضخة الطرد المركزي) لدفع الماء المثلج أو الساخن إلى الوحدات الفرعية أو دافعات الهواء Air Handling Units فضلاً عن مضخات أخرى تقوم بسحب الماء من أبراج التبريد Cooling Towers ودفعه إلى المكثفات المبردة بالماء.

2. **شبكة أنابيب الماء Water Piping System**

وهي الشبكة المسؤولة عن إيصال الماء المثلج أو الماء الساخن إلى الوحدات الفرعية أو دافعات الهواء، وتحتوي الشبكة على عدة ملحقات منها صمامات الماء الثنائية وصمامات الخلط والمسيطرات وغيرها من الملحقات. فضلاً عن شبكة ماء تبريد المكثف التي تكون مستقلة بذاتها.

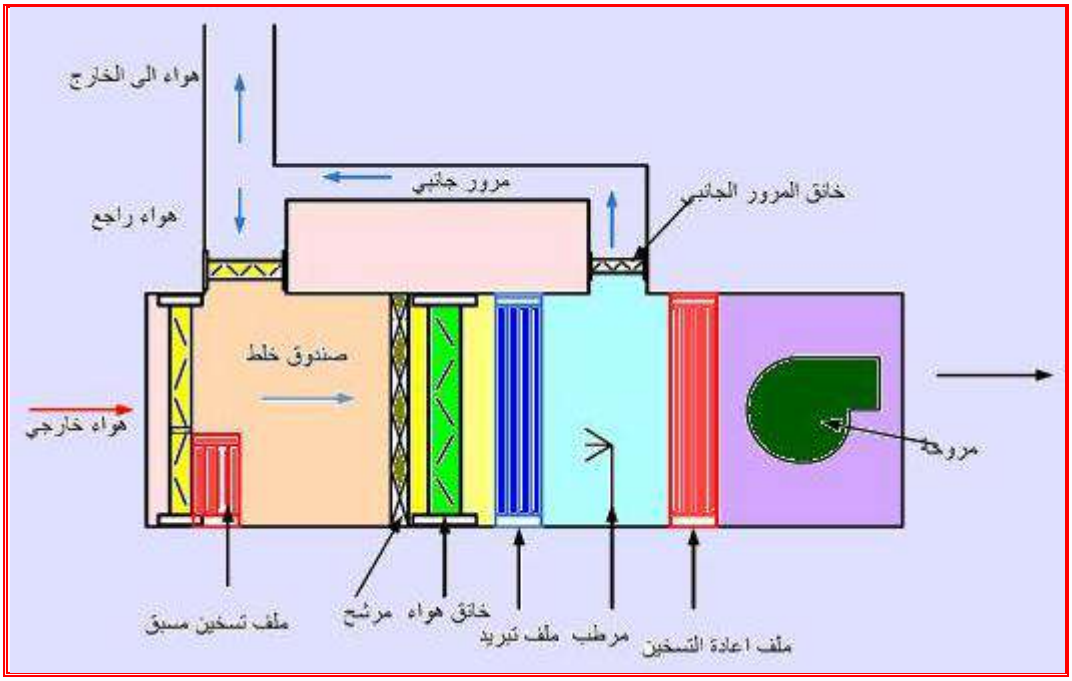
3. **أبراج التبريد Cooling Towers**

وتستعمل في منظومات التبريد ذات المكثفات المبردة بالماء، وتقوم أبراج التبريد بتبريد الماء الساخن الخارج من المكثف لإعادة استعماله مرة ثانية في تبريد المكثف.

رابعاً: جهة التدفئة Heating Side

وتشتمل على ملف التسخين الذي يستلم الماء الساخن من المراجل التي تقوم بتوفير الماء الساخن وسنأتي على شرح الموضوع السابق لاحقاً إن شاء الله في موضوع التدفئة بالماء الساخن.

ويبين الشكل (5-11) مقطع في وحدة دافعة الهواء.



شكل 5-11 مقطع في دافعة هواء في نظام تكييف مركزي

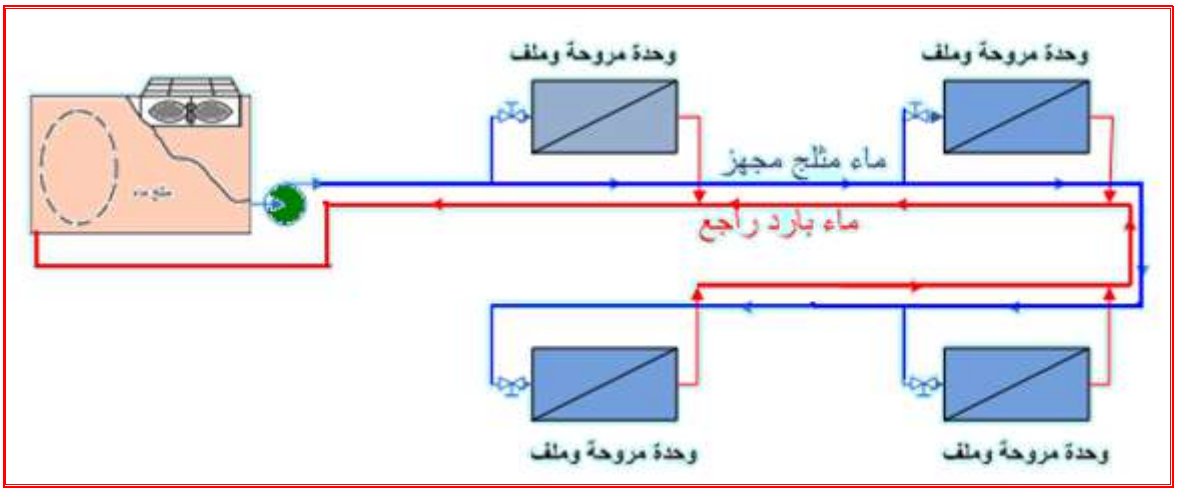
5-2-4-2 نظام وحدات المروحة والملف Fan Coil Units

تتكون وحدة المروحة والملف من صندوق يحتوي على مروحة تقوم بدفع الهواء على ملف تبريد يُستلم الماء المثلج من مثلجات الماء، ويتميز هذا النوع من الأنظمة بعدم حاجته إلى شبكات مجاري الهواء، وبالمقابل يتطلب الأمر نصب شبكات أنابيب مياه معقده، ويُعتمد هذا النظام بكثرة في المستشفيات، وذلك لتميزه باستقلالية لكل غرفة، مما يؤدي إلى عدم تدوير الهواء بين الغرف. وتقسم وحدات المروحة والملف بحسب أسلوب ربطها ببعضها على:

- منظومة ثنائية الأنبوب مع إرجاع مباشر للماء

Two Piping System, Direct Return of Water

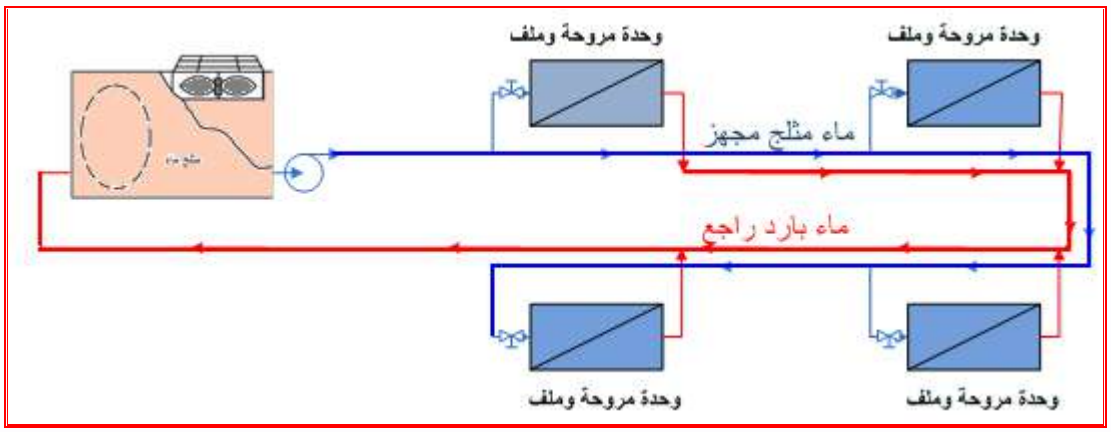
يتم استعمال أنبوبين، أحدهما لدفع الماء المثلج إلى وحدة المروحة والملف، والآخر يقوم بسحب الماء الذي ارتفعت درجة حرارته من وحدة المروحة والملف وإعادته إلى مثلج الماء، ويتم إرجاع الماء مباشرة إلى مثلج الماء حال خروجه من كل وحدة. ومن مساوئ هذا النظام هو الاختلاف الكبير في خسائر الضغط بين وحدة وأخرى، لذا يتطلب الأمر إجراء موازنة لكل وحدة مروحة وملف لضمان إيصال كميات متساوية من الماء لكل وحدة، ويبين الشكل (5-12) وحدة مروحة وملف مع رجوع مباشر للماء.



شكل 5-12 منظومة ثنائية الأنبوب مع إرجاع مباشر للماء

- منظومة ثنائية الأنبوب مع إرجاع عكسي للماء Two Piping System, Reversed Return of Water

تشابه النوع الأول من حيث عدد الأنابيب، وتختلف عنها بجعل مسار الماء لخطي الدفع والسحب متساوياً بالطول لكل وحدة، وبهذا نضمن خسائر ضغط متساوية لكل وحدة، وهذا يؤدي إلى تساوي في كمية الماء المارة في كل وحدة، ومن محاسنها إنها لا تحتاج إلى موازنة لكمية الماء كما هو مطلوب في النوع الأول. وكما مبين في الشكل (5-13).



شكل 5-13 منظومة ثنائية الأنبوب مع إرجاع عكسي للماء

- منظومة ثلاثية الأنابيب Three Piping Water System
- منظومة رباعية الأنابيب Four Piping System

وسيتم شرح النوعين أعلاه لاحقاً إن شاء الله في موضوع التدفئة بالماء الساخن.

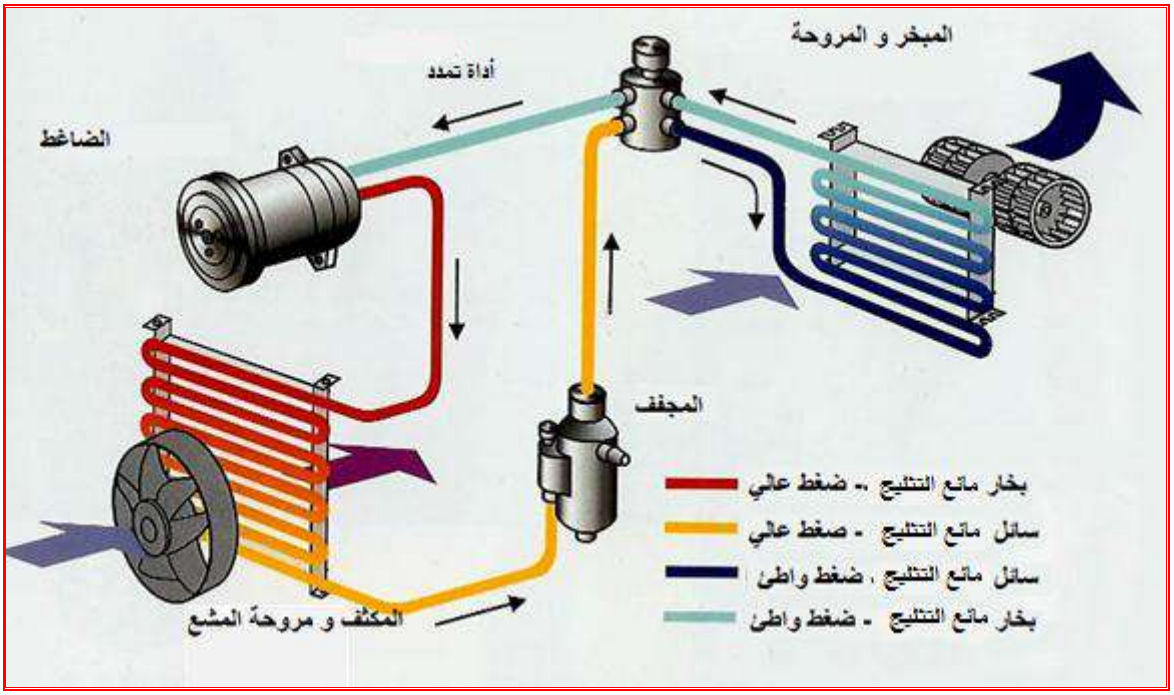
5-5 نظام تكييف السيارة Automobile Air-Conditioning

يتألف جهاز تكييف السيارة، كما في أنظمة التكييف الأخرى من أربعة أجزاء رئيسة وكما هو مبين في الشكل (5-14) وكما يأتي:

أولا: الضاغط Compressor

وهو من النوع المفتوح، ويدار خارجياً بواسطة محرك السيارة ولا سيما في الوحدات الصغيرة، وتستعمل عدة أنواع من الضاغطات في تكييف السيارات، وغالباً ما يتم استعمال الضاغطات الترددية، كما مبين في الشكل (5-15 أ) التي تحتوي على مكابس ترددية تتحرك إما عمودية إلى الأعلى وإلى الأسفل، وإما تكون حركتها أفقية إلى الأمام وإلى الخلف. وعلى هذا الأساس تكون حركة المكبس بواسطة:

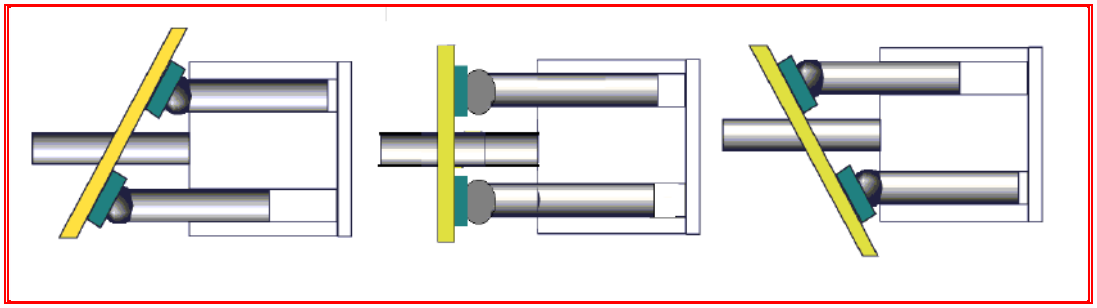
- **عمود المرفق**: يستمد عمود المرفق حركته من محرك السيارة بواسطة البكرات والأحزمة الناقلة، وعند حركة عمود المرفق يقوم بدوره بتحريك المكبس إلى الأعلى وإلى الأسفل بصورة ترددية مما يؤدي إلى ضغط مائع التثليج ورفع ضغطه. ويبين الشكل (5-15 ب) بعض أنواع العمود المرفقي.
- **الصفيحة المحورية Swash Plate**: ويبين الشكل (5-15 ج) الصفيحة المحورية التي تقوم بتحريك المكابس إلى الأمام وإلى الخلف بسبب حركتها كما مبين في الشكل (5-16).



شكل 5-14 دورة التثليج في السيارة

أ- ضاغط مكيف السيارة ب - العمود المرفقي ج - الصفيحة المحورية

شكل 5-15 الضاغط الترددي في السيارة



شكل 5-16 طريقة عمل الضاغط ذي الصفيحة المحورية

ثانياً: القابض المغناطيسي Electromagnetic Clutch:

يعمل القابض المغناطيسي على إيقاف الضاغط وتشغيله، إذ يقوم بوصل صفيحة القابض ببكرة الضاغط عند إيصال التيار الكهربائي إليه مما يؤدي إلى دوران العمود المرفقي أو الصفيحة المحورية، وفي حالة انخفاض درجة الحرارة داخل حيز السيارة يعطي منظم درجة الحرارة إشارة إلى المفتاح الكهربائي مما يؤدي إلى قطع التيار عن القابض المغناطيسي، وهذا يؤدي إلى فصل الاتصال بين القابض وبكرة الضاغط، فيتوقف عمل الضاغط. ويتألف القابض المغناطيسي من ثلاثة أجزاء رئيسة كما هو مبين في الشكل (5-17).

- **صفيحة القابض Armature Plate**: وهي الجزء الأول في القابض المغناطيسي، وتثبت على محور الدوران للضاغط، وتمثل سطح الاحتكاك مع بكرة الضاغط (العضو الدوار) وتزود بنوابض لامتصاص الصدمة الأولى الناتجة من تحول الضاغط من الوقوف إلى الحركة.
- **العضو الدوار (بكرة الضاغط) Pulley**: تقوم البكرة بنقل الحركة من محرك السيارة إلى الضاغط عن طريق محور الدوران.
- **الملف الكهربائي Electrical Coil**: ويعمل الملف على توليد مجال مغناطيسي يؤدي إلى سحب صفيحة القابض إلى بكرة الضاغط، وبالتالي نقل الحركة من المحرك إلى الضاغط، ويزود الملف الكهربائي بتيار مستمر بفرق جهد مقداره (12 V).

شكل 5-17 القابض المغناطيسي لضاغط السيارة

ثالثا: المكثف Condenser:

ويتم تكثيف بخار مائع التثليج في المكثف عن طريق طرح الحرارة الكامنة لتبخر مائع التثليج إلى الخارج، ويوضع مكثف الدورة الانضغاطية إمام مشع السيارة ويستعمل الهواء الخارجي في تبريد المكثف، ويستعمل مكثف مدمج يحتوي على جزء لتبريد سائل مائع التثليج تبريداً فائقاً فضلاً عن المجفف ووعاء الاستلام لتجميع سائل مائع التثليج، ويبين الشكل (5-18) مكثف السيارة وخزان السائل.

شكل 5-18 مكثف السيارة ووعاء الاستلام فيه مجفف ومصفي

رابعا: المبخر Evaporator:

يستعمل المبخر كما هو معروف على إمرار مائع التثليج بحالته السائلة، إذ يمر الهواء الساخن على المبخر مما يؤدي إلى انخفاض درجة حرارة الهواء، وبالمقابل تبخر سائل مائع التثليج في المبخر. ويعمل المبخر أيضاً على إزالة الرطوبة الزائدة من الهواء بحيث يلائم متطلبات راحة الإنسان.

خامساً: أداة التمدد Expansion Device:

تستعمل أداة التمدد لخفض ضغط سائل مائع التثليج من الضغط العالي (ضغط التكثيف) إلى الضغط الواطئ (ضغط المبخر) ليتبخر عند درجات حرارة أدنى، وتستعمل عدة أنواع من أدوات التمدد منها:

- **أنبوب التمدد Orifice Tube**: ويستعمل بكثرة في أنظمة تكييف السيارة لسهولته ويتكون من أنبوب نحاسي بطول يتراوح من 70 إلى 80 ملم، ويزود بمرشح في بدايته لمنع دخول الأجسام الغريبة أو الزيوت المتكتلة، ويربط هذا الأنبوب ببداية المبخر، ويحتوي على ثقب صغير، ومن مساوئ هذا النظام هو إمكانية انسداده بسهولة، ويجب إبداله بآخر عند حدوث الانسداد. ويبين الشكل (5-19 أ) أنبوب التمدد.
- **صمام التمدد الحراري Thermostatic Expansion Valve**: ويعمل صمام التمدد الحراري على السيطرة على تدفق مائع التثليج فضلاً عن وظيفته الرئيسة في خفض الضغط، ويتميز بكفاءة عالية في السيطرة على درجات الحرارة في حيز السيارة تبعاً لاختلاف الحمل الحراري المسلط على السيارة، ويبين الشكل(5-19 ب) صمام التمدد الحراري.

شكل 5-19 أنبوب التمدد وصمام التمدد الحراري

سادساً: الملحقات الأخرى Accessories

يحتوي مكيف السيارة على ملحقات أخرى لغرض إتمام دورة التثليج في السيارة ومن هذه الملحقات:

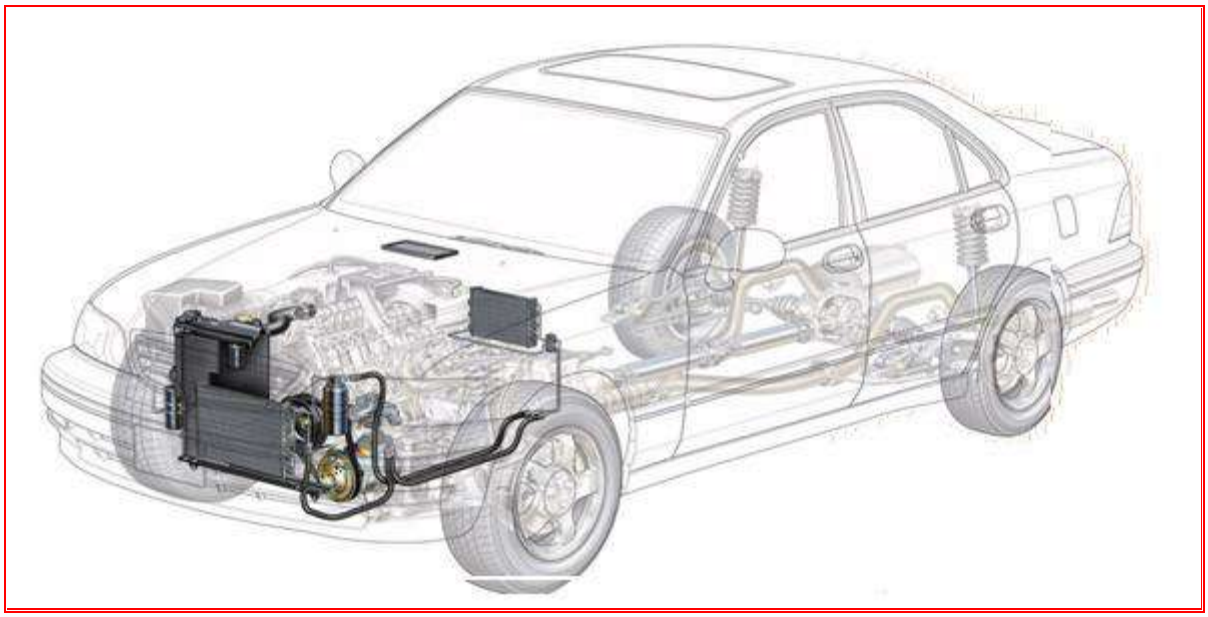
- **وعاء الاستلام Liquid Receivers**: لغرض تجميع السائل الخارج من المكثف.
- **وعاء استلام مجفف Receiver Dryer**: يركب بين المكثف وأداة التمدد، لإزالة الرطوبة وفصل بخار مائع التثليج لضمان مرور مائع التثليج بحالة سائلة فحسب ولضمان تزويد المبخر بكمية مناسبة من مائع التثليج.

- **وعاء الفصل Accumulator**: يقوم وعاء الفصل بفصل السائل عن بخار مائع التثليج لمنع دخول سائل مائع التثليج إلى الضاغط.
- **الأنابيب المرنة Hoses**: وتصنع الأنابيب التي تربط أجزاء منظومة التثليج في السيارة من المطاط المسلح، وذلك لتقليل عمليات اللحام داخل السيارة فضلاً عن تحمل هذه الأنابيب للحركة والاهتزازات التي تتعرض لها المنظومة في أثناء حركة السيارة.

ويبين الشكل (5-20) أجزاء ضاغط السيارة في حين يبين الشكل (5-21) أجزاء منظومة التثليج في السيارة، إما الشكل (5-22) فيبين موقع منظومة التثليج في السيارة.

شكل 5-20 أجزاء ضاغط السيارة

شكل 5-21 أجزاء منظومة التثليج في السيارة



شكل 5-22 موقع منظومة التثليج في السيارة

أسئلة الفصل الخامس

س1: ما العناصر الأساسية التي يتكون منها المكيف الجداري؟

س2: ما الفرق بين المكيف الجداري والمكيف المنفصل؟

س3: مم يتكون المكيف المنفصل؟

س4: عدد أجزاء الوحدة الداخلية للمكيف المنفصل.

س5: عدد أجزاء الوحدة الخارجية للمكيف المنفصل.

س6: ما أنواع منظومات التكييف المركزي؟

س7: مم تتكون وحدة دافعات الهواء؟ وما الفرق بينها وبين الوحدات المجمعة؟

س8: مم يتكون نظام وحدات المروحة والملف؟ وما الفرق بينها وبين وحدات التكييف المنفصلة؟

س9: ما هي مساوئ كل مما يأتي:

- منظومة ثنائية الأنبوب مع إرجاع مباشر للماء؟
- منظومة ثنائية الأنبوب مع إرجاع عكسي للماء؟

س10: ما فائدة القابض المغناطيسي في مكيف السيارة؟ وكيف يعمل؟

س11: املأ الفراغات الآتية بما يناسبها:

1. يستعمل المرطب في وحدات التكييف المركزية لزيادة ..... للهواء المجهز بما يحقق راحة الإنسان في فصل .....، إما عن طريق ..... وإما عن طريق .....
2. يستعمل ملف إعادة التسخين في الوحدات المركزية لرفع درجة حرارة الهواء المكيف ..... شتاءً.
3. تقوم أبراج التبريد بتبريد الماء الساخن ..... لإعادة استعماله مرة ثانية في .....
4. يستعمل نظام ..... بكثرة في المستشفيات، وذلك لتميزه باستقلالية لكل غرفة، مما يؤدي إلى عدم تدوير الهواء بين الغرف.
5. يربط منظم درجة الحرارة في نظام تكييف السيارة بـ ..... للسيطرة على درجة الحرارة داخل السيارة عن طريق إرسال إشارة إلى .....

الفصل السادس

منظومات نقل الهواء وتوزيعه

Ducting Systems

منظومات نقل الهواء وتوزيعه Ducting Systems

1-6 مقدمة Introduction

تقوم مجاري الهواء بنقل الهواء المكيف وتوزيعه من مصادر التكييف إلى الفضاءات المكيفة، وتستعمل المراوح في دفع الهواء عبر شبكة مجاري الهواء، ويتم التوزيع بسرع وضغوط معينة حتى تتحقق راحة الإنسان من ناحية السرعة والضوضاء، وبعد دفع الهواء إلى الفضاء المكيف يتطلب الأمر إعادة سحب الهواء ثم إرجاعه إلى منظومات التكييف لغرض إعادة تكييفه واستعماله مرة أخرى، ويجب أخذ العوامل التالية بالحسبان عند تصميم مجاري الهواء:

1- تحديد مواقع وحدات دفع الهواء.

2- حساب الحمل الحراري للبناية، ومن ثم حساب كمية الهواء المطلوبة لتغطية الحمل الحراري.

3- تحديد كمية الهواء اللازم لكل منطقة من المناطق المكيفة.

4- تحديد خسائر الاحتكاك بين الهواء ومجرى الهواء، ويجب أن تكون أقل ما يمكن، وذلك لتقليل معدل تدفق مراوح دفع الهواء.

2-6 خصائص مجاري الهواء

يجب مراعاة النقاط الآتية عند اختيار المادة التي تصنع منها مجاري الهواء:

1- غير قابلة للاشتعال.

2- مقاومتها العالية للتآكل والصدأ.

3- ذات معامل توصيل حراري واطئ.

4- ذات أسطح ناعمة لتقليل خسائر الاحتكاك.

5- سهلة التشكيل والتوصيل وخفيفة الوزن.

6- تصنع من مواد لا تضر بالصحة العامة وصديقة للبيئة.

ملاحظة

تكون مقاطع مجاري الهواء إما دائرية المقطع وإما مستطيلة المقطع، يستعمل المقطع المستطيل غالباً لسهولة تصنيعه من ناحية، ولحاجته إلى ارتفاع أقل من تلك المستديرة.

3-6 اعتبارات تصميمية

يجب الأخذ بالإمور التصميمية أدناه :

- تجنب الانحناءات الحادة والتوسعات المفاجئة.
- ألا تزيد نسبة ارتفاع مجرى الهواء إلى عرضه عن 6:1 إلا في الحالات الخاصة جداً بحيث لا تتجاوز هذه النسبة 10:1 في أية حال من الأحوال.
- يتم اعتماد السرع التالية في كل مقطع من مقاطع مجرى الهواء، كما مبين في الجدول (6-1).

جدول 6-1 السرع المسموح بها في مجاري الهواء

الاستعمال	السرعة m/s		
	منزلي	مدارس وأماكن عامة	معامل
مأخذ الهواء الخارجي	3.5	4	5
المرشحات	1.3	1.5	1.8
ملفات التدفئة	2.3	2.5	3
غاسلات الهواء	2.5	2.5	2.5
ارتباط خط السحب	3.5	4	5
مخرج المروحة	8-5	10-6.6	12-8
المجرى الرئيس	4.5-3.5	6.6-5	9-6
المجرى الفرعي	3	4.5-3	5-4
المجرى الصاعد	2.5	3.5-3	4

4-6 طرائق حساب أبعاد مجاري الهواء

يمكن حساب أبعاد مجاري الهواء بأربع طرائق شائعة، ولكل طريقة اعتباراتها التصميمية، وتُعد طريقة ثبوت هبوط الضغط أكثر الطرائق اعتماداً لسهولتها ودقتها. ويمكن ذكر ملخص لكل طريقة، كما يأتي:

1- طريقة فرض السرعة Assumed – Velocity Method

في هذه الطريقة يتم فرض سرعة معينة لكل مقطع من مقاطع مجرى الهواء بحسب الحدود المسموح بها، ومنها يتم حساب مساحة المقطع ومن ثم حساب أبعاد مجرى الهواء وخسائر الضغط في المجرى. تُعتمد هذه الطريقة في مجاري الهواء بسيطة التركيب.

2- طريقة هبوط الضغط المتساوي Constant-Pressure-Drop Method

هذه الطريقة هي الأكثر شيوعاً في حساب أبعاد مجاري الهواء، ويتم فيها حساب خسائر الاحتكاك (خسائر الضغط) لوحدة واحدة في المجرى الرئيس مثل باسكال لكل متر (Pa/m)، ومن ثم تُعد هذه القيمة ثابتة لجميع أجزاء مجرى الهواء.

3- طريقة موازنة خسائر الضغط Balanced-Pressure-Loss Method

ويتم في هذه الطريقة فرض خسائر الاحتكاك من مخرج المروحة إلى التفرع في المجرى الرئيس واعتبار هذه القيمة متساوية لكل منطقة تفرع.

4- طريقة إعادة كسب الضغط الاستاتيكي Static -Regain Method

ويتم فيها حساب المقدار المطلوب لإعادة استقرار الضغط لكل مقطع من مقاطع مجرى الهواء.

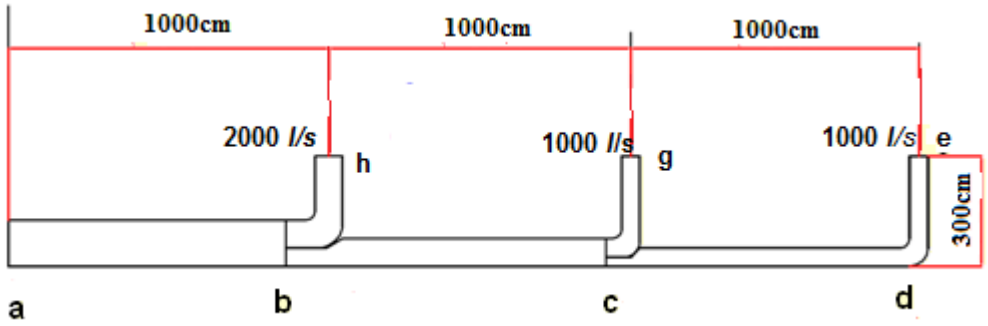
طريقة ثبوت هبوط الضغط Constant Pressure Drop Method

ستعتمد طريقة ثبوت الضغط في تصميم مجاري الهواء في هذا الفصل، وسيتم شرح هذه الطريقة بحل المثال الآتي:

مثال 1

احسب أبعاد مجرى الهواء المبين في الشكل، وكذلك خسائر الاحتكاك، إذا علمت إن أقصى سرعة في مجرى الهواء الرئيس هي 5.33 m/s، وأقصى ارتفاع لمجرى الهواء الرئيس هو 500 mm، اعتمد طريقة ثبوت هبوط الضغط.

الجواب



تتبع الخطوات التالية في حساب أبعاد مجرى الهواء أعلاه:

1- حساب كمية الهواء الكلية المارة في المجرى، وذلك عن طريق جمع معدل التدفق الحجمي للهواء في نهايات مجرى الهواء كما يأتي:

معدل تدفق حجم الهواء الكلي في مجرى الهواء الرئيسي (b – a)

$$\dot{V}_{a-b} = 1000 + 1000 + 2000 = 4000 \ \ell/s$$

2- حساب أبعاد مجرى الهواء باعتماد المعادلة الآتية:

$$\dot{V} = A \times v$$

إذ أن

$\dot{V}$	معدل تدفق الهواء المار في المجرى الرئيس	m^3/s
A	مساحة مقطع مجرى الهواء الرئيس	m^2
v	سرعة الهواء القصوى في المجرى الرئيس	m/s

$$m^3 = 1000 \ \ell \ \rightleftarrows \ 4000 \ \ell = 4 \ m^3$$

$$4 = A \times 5.33 \ \rightleftarrows \ A = 0.75 \ m^2$$

3- يحسب أبعاد مجرى الهواء الرئيس اعتماداً على ارتفاع مجرى الهواء الذي يكون معروفاً عن طريق تحديد أقصى ارتفاع له بحيث يتوافق مع متطلبات البناية (تصميم البناية). وبعد تطبيق المعادلة أدناه يمكن أن تحدد أبعاد مجرى الهواء الرئيس.

$$A = W \times H$$

$$0.75 = W \times 0.5$$

إذ يمثل الرقم 0.5 m أقصى ارتفاع لمجرى الهواء، كما تم توضيحه في المثال.

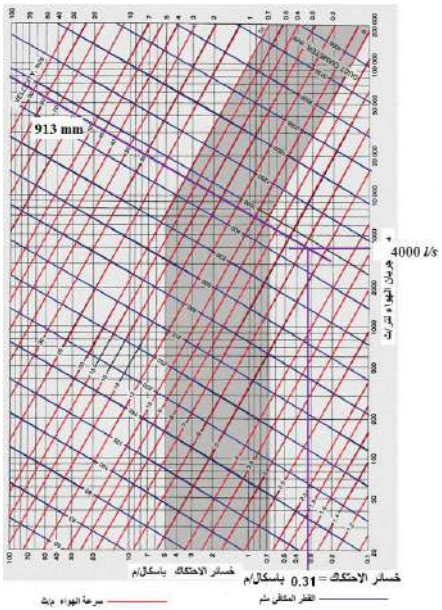
$$W = 1.5\ m = 1500\ mm$$

ويمثل عرض مجرى الهواء الرئيسي.

4- اعتماداً على الجدول (6-2) الذي يمثل القطر المكافئ لمجرى الهواء المستطيل، يستخرج قطر مجرى الهواء المكافئ اعتماداً على عرض مجرى الهواء الذي يساوي 1500 mm وارتفاع 500 mm وكما يأتي:

يحدد ارتفاع مجرى الهواء (500 mm) على المحور الأفقي وعرض مجرى الهواء (1500 mm) على المحور العمودي كما موضح في الجدول الآتي:

العرض mm \ الارتفاع mm	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	900
	القطر المكافئ																			
100	109																			
125	122	137																		
150	133	150	164																	
175	143	161	177	191																
200	152	172	189	204	219															
225	161	181	200	216	232	246														
250	169	190	210	228	244	259	273													
275	176	199	220	238	256	272	287	301												
300	183	207	229	248	266	283	299	314	328											
350	195	222	245	267	286	305	322	339	354	383										
400	207	235	260	283	305	325	343	361	378	409	437									
450	217	247	274	299	321	343	363	382	400	433	464	492								
500	227	258	287	313	337	360	381	401	420	455	488	518	547							
550	236	269	299	326	352	375	398	419	439	477	511	543	573	601						
600	245	279	310	339	365	390	414	436	457	496	533	567	598	628	656					
650	253	289	321	351	378	404	429	452	474	515	553	589	622	653	683	711				
700	261	298	331	362	391	418	443	467	490	533	573	610	644	677	708	737	765			
750	268	306	341	373	402	430	457	482	506	550	592	630	666	700	732	763	792	820		
800	275	314	350	383	414	442	470	496	520	567	609	649	687	722	755	787	818	847	875	
900	289	330	367	402	435	465	494	522	548	597	643	686	726	763	799	833	866	897	927	984
1000	301	344	384	420	454	486	517	546	574	626	674	719	762	802	840	876	911	944	976	1037
1100	313	358	399	437	473	506	538	569	598	652	703	751	795	838	878	916	953	988	1022	1086
1200	324	370	413	453	490	525	558	590	620	677	731	780	827	872	914	954	993	1030	1066	1133
1300	334	382	426	468	506	543	577	610	642	701	757	808	857	904	948	990	1031	1069	1107	1177
1400	344	394	439	482	522	559	595	629	662	724	781	835	886	934	980	1024	1066	1107	1146	1220
1500	353	404	452	495	536	575	612	648	681	745	805	860	913	963	1011	1057	1100	1143	1183	1260
1600	362	415	463	508	551	591	629	665	700	766	827	885	939	991	1041	1088	1133	1177	1219	1298
1700	371	425	475	521	564	605	644	682	718	785	849	908	964	1018	1069	1118	1164	1209	1253	1335
1800	379	434	485	533	577	619	660	698	735	804	869	930	988	1043	1096	1146	1195	1241	1286	1371
1900	387	444	496	544	590	633	674	713	751	823	889	952	1012	1068	1122	1174	1224	1271	1318	1405
2000	395	453	506	555	602	646	688	728	767	840	908	973	1034	1092	1147	1200	1252	1301	1348	1438
2100	402	461	516	566	614	659	702	743	782	857	927	993	1055	1115	1172	1226	1279	1329	1378	1470
2200	410	470	525	577	625	671	715	757	797	874	945	1013	1076	1137	1195	1251	1305	1356	1406	1501
2300	417	478	534	587	636	683	728	771	812	890	963	1031	1097	1159	1218	1275	1330	1383	1434	1532
2400	424	486	543	597	647	695	740	784	826	905	980	1050	1116	1180	1241	1299	1355	1409	1461	1561
2500	430	494	552	606	658	706	753	797	840	920	996	1068	1136	1200	1262	1322	1379	1434	1488	1589
2600	437	501	560	616	668	717	764	810	853	935	1012	1085	1154	1220	1283	1344	1402	1459	1513	1617
2700	443	509	569	625	678	728	776	822	866	950	1028	1102	1173	1240	1304	1366	1425	1483	1538	1644
2800	450	516	577	634	688	738	787	834	879	964	1043	1119	1190	1259	1324	1387	1447	1506	1562	1670
2900	456	523	585	643	697	749	798	845	891	977	1058	1135	1208	1277	1344	1408	1469	1529	1586	1696



يلاحظ أن التقاطع هو عند قطر المجرى المكافئ هو 913 mm.

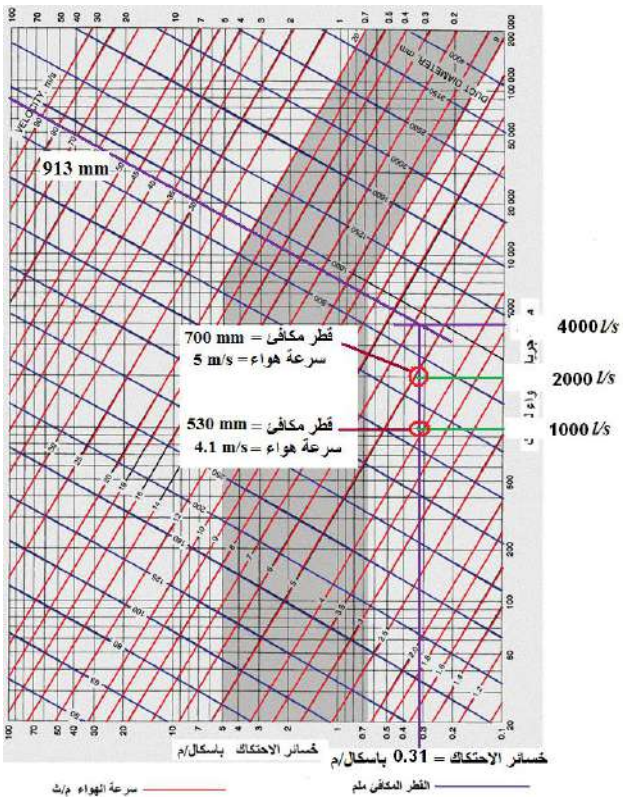
5- الشكل (6-1) يمثل العلاقة بين قطر المجرى المكافئ ومعدل تدفق الهواء وخسائر الاحتكاك (هبوط الضغط)، ومن تقاطع معدل تدفق الهواء الكلي مع القطر المكافئ يمكن تحديد خسائر الاحتكاك لكل متر من مجرى الهواء، كما مبين في الشكل المجاور

من التقاطع يلاحظ أن خسائر الاحتكاك تساوي 0.31 Pa/m وسرعة الهواء 5.4 m/s

6- يتم عمل الجدول الآتي، بعد أن يرمز إلى أجزاء مجرى الهواء بأحرف أو أرقام، كما مبين في الشكل السابق.

المقطع	حجم الهواء	العرض	الارتفاع	السرعة	القطر المكافئ
	ℓ/s	mm	mm	m/s	mm
a – b	4000	1500	500	5.4	913
b – c	2000			5	700
c – d	1000			4.1	530

7- من الشكل (6-1) بعد معرفة معدل تدفق الهواء لكل مقطع، يستخرج القطر المكافئ لكل مقطع من مقاطع مجرى الهواء، عن طريق تقاطع معدل تدفق الهواء 2000 ℓ/s مع الخط العمودي الذي يمثل خط ثبوت هبوط الضغط، وعند نقطة التقاطع يمكن قراءة قيمة القطر المكافئ التي تساوي 700 mm، وسرعة هواء تساوي 5 m/s، ومن تقاطع معدل تدفق الهواء 1000 ℓ/s مع الخط العمودي الذي يمثل خط ثبوت هبوط الضغط يتم قراءة القطر المكافئ 530 mm، وسرعة 4.1 m/s، كما مبين في الشكل الآتي:



8- وبالرجوع للجدول (6-2): ومن ارتفاع مجرى الهواء التصميمي الذي يساوي 500 mm، تتم قراءة أقرب رقم إلى القطر المكافئ (700 mm) والذي مقداره 726 mm، ومن هذا الرقم يتم تحديد عرض مجرى الهواء ويساوي 900 mm.

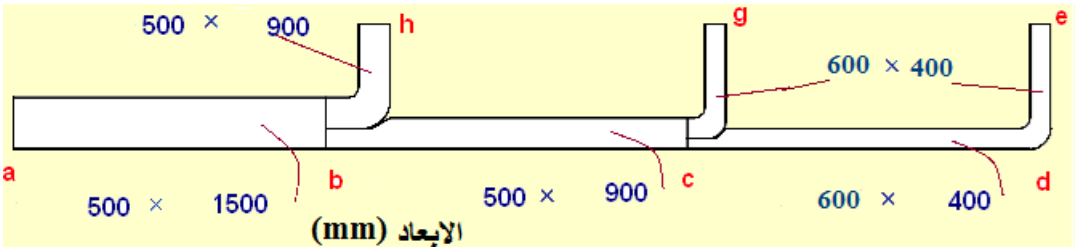
وبالتالي يكون القياس هو: عرض مجرى الهواء (900 mm) وارتفاعه (500 mm).

وبالعودة إلى الجدول (6-2)، يلاحظ أن تحت الارتفاع الذي مقداره 500 mm، لا يوجد رقم مقارب إلى القطر المكافئ 530 mm، لذا يتم اختيار ارتفاعاً جديداً لمجرى الهواء أصغر من الارتفاع التصميمي وليكن 400 mm، ومن ملاحظة أقرب رقم للقطر المكافئ 530 mm تحت الارتفاع 400 mm، نلاحظ أن الرقم على اليسار يساوي 600 mm، ولهذا يكون عرض مجرى الهواء يساوي (600 mm) وارتفاع (400 mm).

العرض mm \ الارتفاع mm	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	900
القطر المكافئ																				
100	109																			
125	122	137																		
150	133	150	164																	
175	143	161	177	191																
200	152	172	189	204	219															
225	161	181	200	216	232	246														
250	169	190	210	228	244	259	273													
275	176	199	220	238	256	272	287	301												
300	183	207	229	248	266	283	299	314	328											
350	195	222	245	267	286	305	322	339	354	383										
400	207	235	260	283	305	325	343	361	378	409	437									
450	217	247	274	299	321	343	363	382	400	433	464	492								
500	227	258	287	313	337	360	381	401	420	455	488	518	547							
550	236	269	299	326	352	375	398	419	439	477	511	543	573	601						
600	245	279	310	339	365	390	414	436	457	496	533	567	598	628	656					
650	253	289	321	351	378	404	429	452	474	515	553	589	622	653	683	711				
700	261	298	331	362	391	418	443	467	490	533	573	610	644	677	708	737	765			
750	268	306	341	373	402	430	457	482	506	550	592	630	666	700	732	763	792	820		
800	275	314	350	383	414	442	470	496	520	567	609	649	687	722	755	787	818	847	875	
900	289	330	367	402	435	466	494	522	548	597	643	686	726	763	799	833	866	897	927	984
1000	301	344	384	420	454	486	517	546	574	626	674	719	762	802	840	876	911	944	976	1037
1100	313	358	399	437	473	506	538	569	598	652	703	751	795	838	878	916	953	988	1022	1086
1200	324	370	413	453	490	525	558	590	620	677	731	780	827	872	914	954	993	1030	1066	1133
1300	334	382	426	468	506	543	577	610	642	701	757	808	857	904	948	990	1031	1069	1107	1177
1400	344	394	439	482	522	559	595	629	662	724	781	835	886	934	980	1024	1066	1107	1146	1220
1500	353	404	452	495	536	575	612	648	681	745	805	860	913	963	1011	1057	1100	1143	1183	1260
1600	362	415	463	508	551	591	629	665	700	766	827	885	939	991	1041	1088	1133	1177	1219	1298
1700	371	425	475	521	564	605	644	682	718	785	849	908	964	1018	1069	1118	1164	1209	1253	1335
1800	379	434	485	533	577	619	660	698	735	804	869	930	988	1043	1096	1146	1195	1241	1286	1371
1900	387	444	496	544	590	633	674	713	751	823	889	952	1012	1068	1122	1174	1224	1271	1318	1405
2000	395	453	506	555	602	646	688	728	767	840	908	973	1034	1092	1147	1200	1252	1301	1348	1438
2100	402	461	516	566	614	659	702	743	782	857	927	993	1055	1115	1172	1226	1279	1329	1378	1470
2200	410	470	525	577	625	671	715	757	797	874	945	1013	1076	1137	1195	1251	1305	1356	1406	1501
2300	417	478	534	587	636	683	728	771	812	890	963	1031	1097	1159	1218	1275	1330	1383	1434	1532
2400	424	486	543	597	647	695	740	784	826	905	980	1050	1116	1180	1241	1299	1355	1409	1461	1561
2500	430	494	552	606	658	706	753	797	840	920	996	1068	1136	1200	1262	1322	1379	1434	1488	1589
2600	437	501	560	616	668	717	764	810	853	935	1012	1085	1154	1220	1283	1344	1402	1459	1513	1617
2700	443	509	569	625	678	728	776	822	866	950	1028	1102	1173	1240	1304	1366	1425	1483	1538	1644
2800	450	516	577	634	688	738	787	834	879	964	1043	1119	1190	1259	1324	1387	1447	1506	1562	1670
2900	456	523	585	643	697	749	798	845	891	977	1058	1135	1208	1277	1344	1408	1469	1529	1586	1696

9- يتم إكمال الجدول وكما يأتي:

المقطع	حجم الهواء	العرض	الارتفاع	السرعة	القطر المكافئ
	ℓ/s	mm	mm	m/s	mm
a – b	4000 يجمع لكل مجرى	1500 يحسب من المعادلتين	500 يفرض	5.4 من شكل (1-6)	913 من جدول (2-6)
b – c	2000	900 من جدول (2-6)	500 يفرض	5 من شكل (1-6)	700 من شكل(1-6)
c –d	1000	600 من جدول (2-6)	400 يفرض	4.1 من شكل (1-6)	530 من شكل (1-6)



يلاحظ توافق ابعاد مقطع مجرى الهواء مع تساوي معدل تدفق الهواء المار في كل مجرى.

خسائر الاحتكاك: تحصل خسائر الاحتكاك في مجاري الهواء لسببين هما:

- خسائر الضغط بسبب سريان الهواء في المجاري المستقيمة، **ويؤخذ أطول مسار لمجرى الهواء.**
- خسائر الضغط بسبب مرور الهواء في تراكيب مجاري الهواء من انحناءات وتفرعات ومرشحات.

أولاً: خسائر الاحتكاك بسبب سريان الهواء في مجاري الهواء المستقيمة، التي تمثل اطول مسار a-b-c-d-e في مجرى الهواء.

$$L_{a\text{-}b\text{-}c\text{-}d\text{-}e} = 1000+1000+1000+300 = 3300 \text{ cm} = 33 \text{ m}$$

من الشكل (6-1) تم استخراج خسائر الاحتكاك لكل متر، وكان يساوي 0.31 Pa/m

إذاً خسائر الاحتكاك بسبب سريان الهواء في المجاري المستقيمة

$$\Delta P_{a\text{-}b\text{-}c\text{-}d\ (L)} = 33 \times 0.31 = 10.23 \text{ Pa}$$

ثانياً: خسائر الاحتكاك بسبب تراكيب مجاري الهواء:

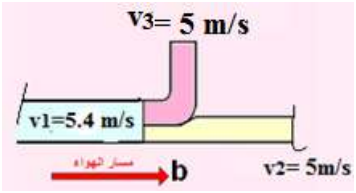
يتم اعتماد المعادلة الآتية لحساب خسائر الضغط (ΔP) في تراكيب مجاري الهواء:

$$\Delta P = 0.6 \times C \times v_2^2$$

إذ أن

ΔP	خسائر الضغط	**Pa**
C	معامل الاحتكاك - جدول (6-3)	
v	سرعة الهواء في المجرى الثانوي	**m/s**

وبعد الاطلاع على شكل مجرى الهواء يمكن ملاحظة أن الهواء يمر بالتراكيب الداخلية، وكما يأتي: التفرع b، والتفرع c، والانحناء d.



التفرع b:

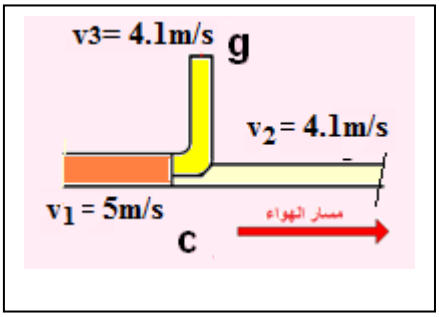
بعد الاطلاع على شكل التفرع يلاحظ إن اتجاه الهواء هو أفقي، أي إن السرع المعتمدة هي 5.4 m/s المجرى الرئيسي و 5 m/s (سرعة الهواء في التفرع الأفقي) إذاً:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{5}{5.4} = 0.926$$

من الجدول (6-3- و) يلاحظ أن اقرب رقم إلى 0.926 هو 0.8 ولم يتم اختيار الرقم 1، لكون خسائر الاحتكاك المناظرة للرقم 0.8 هي أكبر من تلك التي تناظر الرقم 1، وهذا يعطي معامل أمان لضمان وصول الهواء إلى نهاية مجرى الهواء. لذا يكون معامل الاحتكاك C = 0.18 مناظرة للرقم (0.8).

وعلى هذا الأساس تكون خسائر الضغط تساوي:

$$\Delta P_b = 0.6 \times C \times v^2 = 0.6 \times 0.18 \times 5^2 = 2.7 \text{ Pa}$$



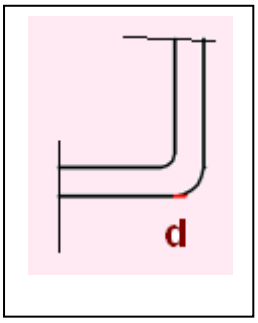
التفرع c:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{4.1}{5} = 0.82$$

من الجدول (3-6 و)، سيكون معامل الاحتكاك

C = 0.18 ، وخسائر الضغط في التفرع هي:

$$\Delta P_c = 0.6 \times 0.18 \times 4.1^2 = 1.8 \text{ Pa}$$



الانحناء d:

من الجدول (3-6 هـ)، وعند الانحناء d، تكون خسائر الاحتكاك تساوي 0.67، من خلال معامل الاحتكاك يمكن حساب خسائر الاحتكاك في الانحناء d كما يأتي:

$$\Delta P_d = 0.6 \times 0.67 \times 4.1^2 = 6.75 \text{ Pa}$$

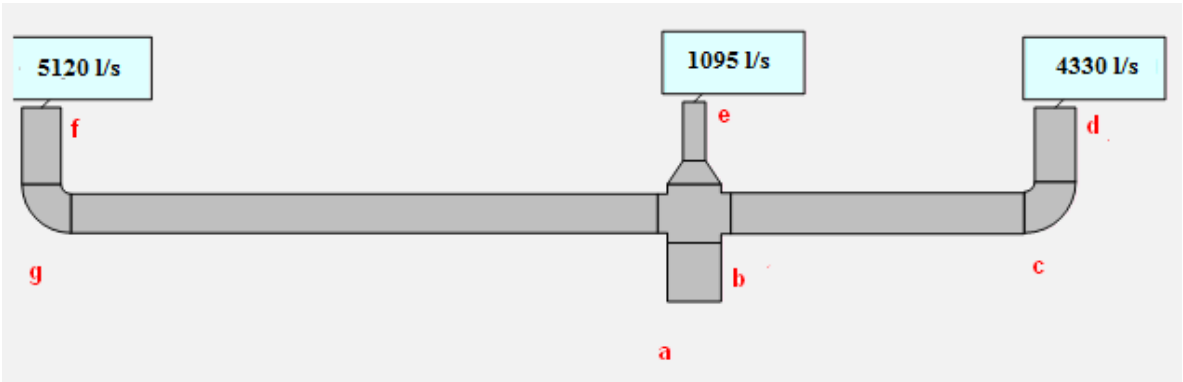
إذاً خسائر الاحتكاك في مجرى الهواء a-b-c-d-e

$$\Delta P_T = \Delta P_L + \Delta P_b + \Delta P_c + \Delta P_d = 10.23+2.7+1.8+6.75$$

$$= 21.48 \text{ Pa}$$

مثال2

احسب أقطار مجرى الهواء الدائري المبين أدناه، إذا علمت أن أقصى سرعة مسموح بها هي 7.2 m/s ، اعتمد طريقة ثبوت الضغط.



الجواب

تتبع الخطوات الآتية في حساب أبعاد مجرى الهواء أعلاه:

1- حساب كمية الهواء الكلية المارة في المجرى، وذلك عن طريق جمع معدل التدفق للهواء في نهايات مجرى الهواء وكما يأتي:

حجم الهواء الكلي في مجرى الهواء الرئيس a-b

$$\dot{V}_{a-b} = 4330 + 1095 + 5120 = 10545\ \ell/s = 10.545\ m^3/s$$

2- حساب إبعاد مجرى الهواء باعتماد المعادلة الآتية:

$$\dot{V} = A \times v$$

$$10.545 = A \times 7.2 \quad \rightleftarrows \quad A = 1.47\ m^2$$

مساحة مقطع مجرى الهواء الرئيسي تساوي $A = 1.47\ m^2$

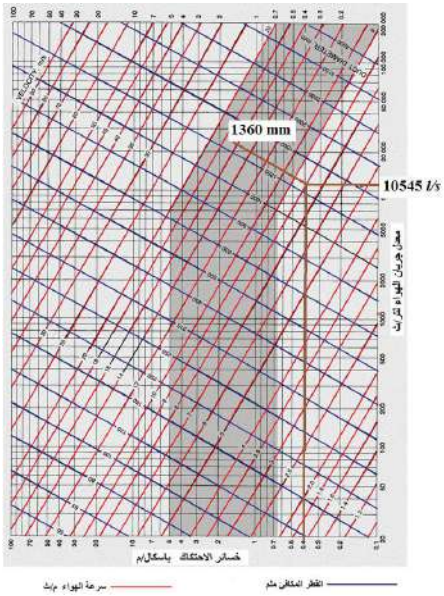
3- يحسب قطر مجرى الهواء الرئيسي، وبعد تطبيق المعادلة اللاحقة يمكن تحديد أبعاد مجرى الهواء الرئيس.

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2$$

$$D^2 = 4A/3.14 = 1.86\ m^2$$

$$D = \sqrt{1.86} = 1.36\ m$$

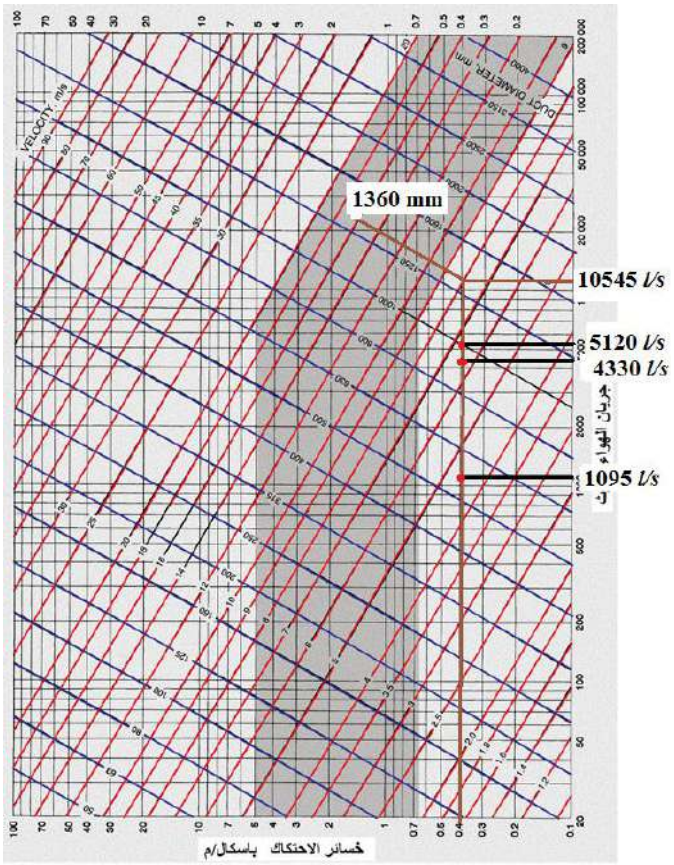
4- الشكل (6-1) يمثل العلاقة بين قطر مجرى الهواء المكافئ ومعدل تدفق الهواء وخسائر الاحتكاك، ومن تقاطع قطر مجرى الهواء 1360 mm، مع معدل تدفق الهواء الكلي (10545 ℓ/s) يمكن الحصول على الخط التصميمي الرئيس لخسائر الاحتكاك الذي يقع عند 0.4 Pa/m



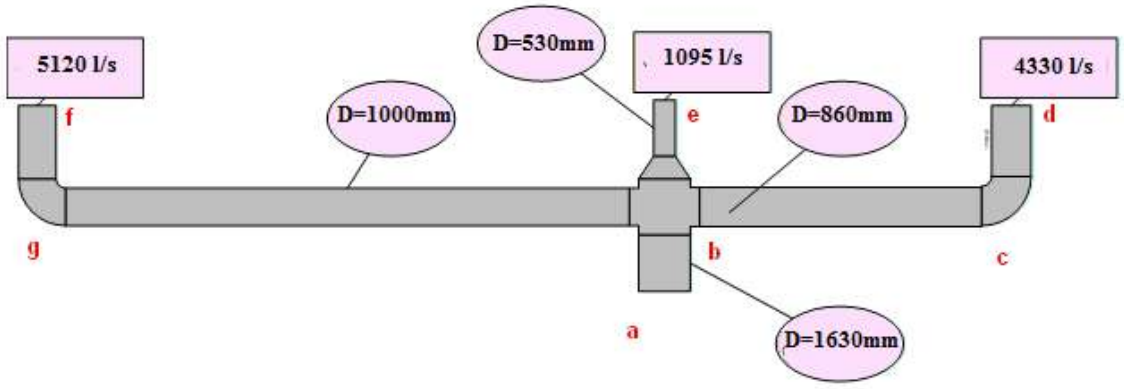
5- يتم عمل الجدول الآتي، بعد أن يرمز إلى أجزاء مجرى الهواء بأحرف أو أرقام، كما مبين في الشكل أعلاه.

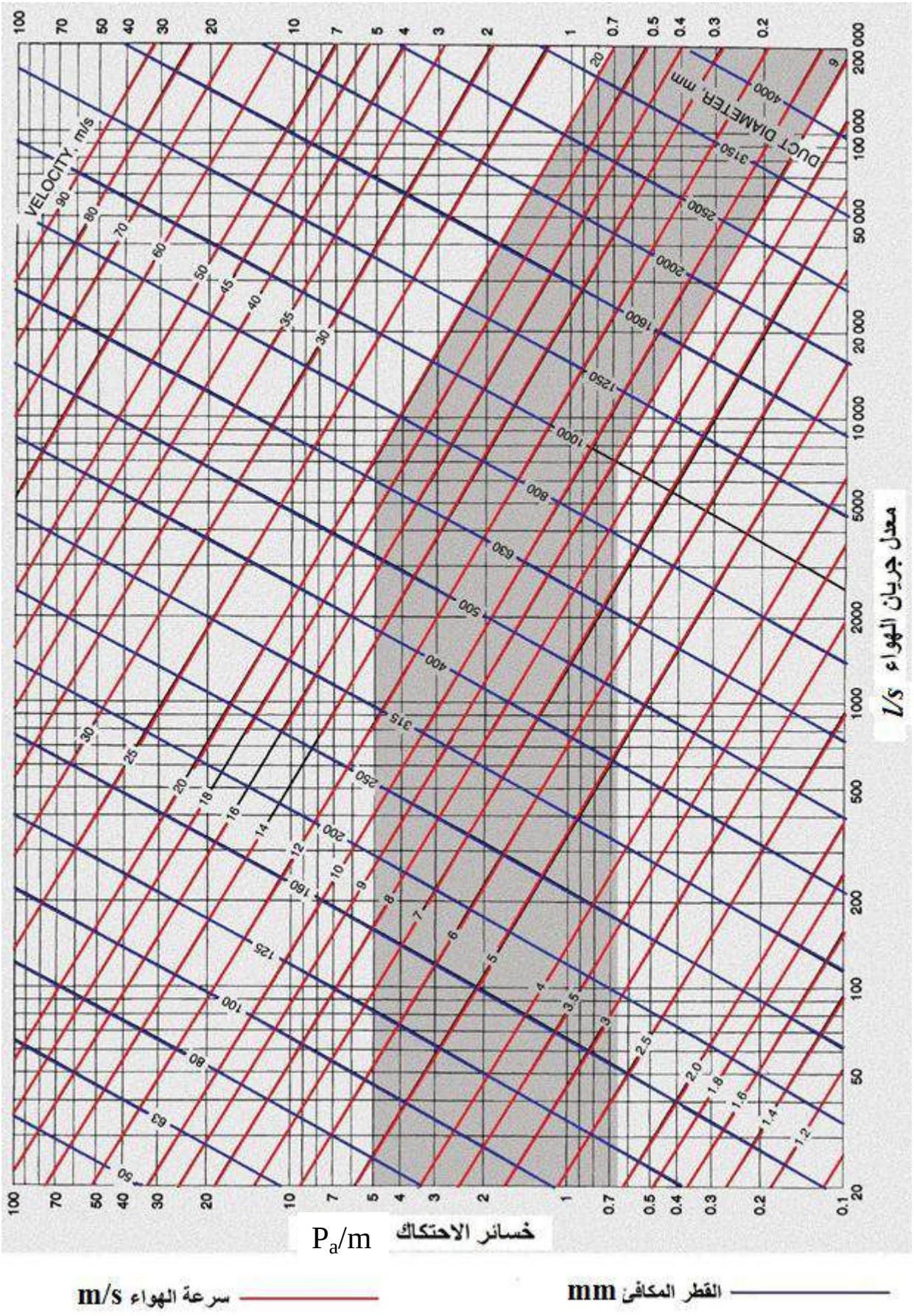
المقطع	حجم الهواء	السرعة	القطر المكافئ
	ℓ/s	m/s	mm
a-b	10545	7.2	1360
b-f	5120	5.8	1000
b-d	4330	5	860
b-e	1095	3.8	530

6- من الشكل (6-1) وبعد معرفة معدل تدفق الهواء لكل مقطع، يستخرج القطر المكافئ لكل مقطع من مقاطع مجرى الهواء، عن طريق تقاطع معدل تدفق الهواء 5120 ℓ/s مع الخط العمودي الذي يمثل خط ثبوت هبوط الضغط، وعند نقطة التقاطع يمكن قراءة قيمة القطر المكافئ ويساوي 1000 mm، وسرعة الهواء التي تساوي 5.8 m/s ، ومن تقاطع معدل تدفق الهواء 4330 ℓ/s مع الخط العمودي الذي يمثل خط ثبوت هبوط الضغط يمكن قراءة القطر المكافئ 860 mm ، وسرعة 4.1 m/s ، ومن تقاطع معدل تدفق الهواء 1095 ℓ/s مع الخط العمودي الذي يمثل خط ثبوت هبوط الضغط يمكن قراءة القطر المكافئ 530 mm ، وسرعة 3.8 m/s، وكما هو مبين في الشكل اللاحق:



وبهذا تكون أبعاد مجرى الهواء كما موضحة في الجدول السابق والشكل الآتي:





شكل 6-1 مخطط خسائر الاحتكاك مع معدل تدفق الهواء والقطر المكافئ لمجرى الهواء.

5-6 منظومات الهواء الراجع

يتم إرجاع جزء من الهواء المكَيف، الذي يتم سحبه من الغرفة، إلى منظومة التكييف مرة ثانية بعد خلطه بجزء من الهواء النقي، وبعد ذلك يتم إعادة تكييف الخليط مرة ثانية، وتستعمل هذه العملية لتقليل الحمل على منظومة التكييف. لذا يجب أن يزود نظام التكييف المركزي بمنظومة هواء راجع، فضلاً عن منظومة دفع الهواء، لذا يتم تزويد الغرف بشبابيك للهواء الراجع، إذ تربط هذه الشبابيك إلى خط سحب الهواء لمروحة التكييف المركزي، وفي بعض الأحيان تربط إلى مروحة مستقلة للقيام بعملية السحب.

وتقدر خسائر الاحتكاك لمنظومة الهواء الراجع بمقدار 80% من خسائر الاحتكاك لمنظومة دفع الهواء.

6-6 توزيع الهواء في الغرف

يُعد التوزيع الجيد للهواء المكيف في الغرفة من أساسيات راحة الإنسان، ويجب أن يحقق التوزيع الجيد للهواء في الغرفة العوامل الآتية:

1- يكون التغير في درجة حرارة الغرفة بمقدار درجة سيليزية واحدة من درجة الحرارة التصميمية للغرفة.

2- أن تكون سرعة الهواء داخل الغرفة (0.13-0.18) m/s للتطبيقات التي يكون فيها الأشخاص في حالة الجلوس، وفي التطبيقات التي يكون فيها الأشخاص في حالة حركة هي (0.25-0.4) m/s، وهذه السرع تبعث الراحة للإنسان.

3- يجب أن يحتوي نظام توزيع الهواء على:

- **مروحة تقوم بدفع الهواء في مجرى الهواء، على أن تتغلب على خسائر الضغط لجميع مكونات شبكة مجاري الهواء.**
- **مخارج الهواء داخل الغرف.**
- **منظومة الهواء الراجع التي تقوم بسحب الهواء من الغرف.**

1-6-6 أنواع مُعدات توزيع الهواء وسحبه في الغرف

تصنع مُعدات توزيع الهواء في الغرف عادة من الألمنيوم المطلي حرارياً، وتصنع بعدة أبعاد وإشكال اعتماداً على معدل تدفق الهواء الذي تقوم بدفعه وطبيعة الاستعمال. وتصنف أدوات دفع الهواء كما يأتي:

أ- مُعدات توزيع الهواء المكيف Conditioned Air Terminal Equipment

وتقسم إلى:

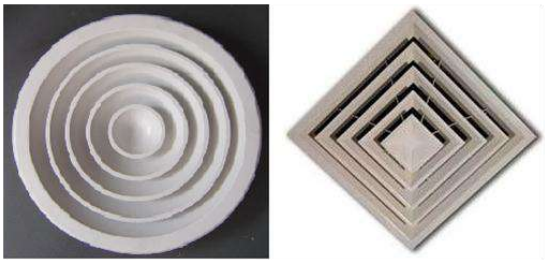
1- شبابيك الهواء الجدارية مع الحاكمات Grills and Registers

تتكون شبابيك الهواء وحاكماته من إطار مستطيل مركبة عليه زعانف متوازية، وتستعمل الزعانف في التحكم بمعدل تدفق واتجاه الهواء الخارج منه. وتركب أعلى الجدران في التبريد (وتحت الشبابيك في حالة التدفئة أحياناً). ويبين الشكل (6-2) بعض أنواع شبابيك الهواء مع الحاكمات.

2- الناشرات السقفية Ceiling Diffusers

تركب في السقف الثانوي للبناية، وتكون بعدة أشكال بحيث تتناسب مع تصاميم (ديكورات) الغرف، وتكون إما دائرية أو مربعة أو مستطيلة، ويتم اختيار الشكل بحيث يحقق توزيع أفضل للهواء. ويبين الشكل (3-6) بعض أنواع ناشرات الهواء السقفية.

شكل 6-2 شبابيك الهواء مع الحاكمات



شكل 6-3 الناشرات السقفية

3- موزعات الهواء الطولية Linear Diffuser or Slot Diffuser

وهي عبارة عن موزعات تمتاز بالطول، وتستعمل في سقوف القاعات الكبيرة، وغالباً ما توضع قرب الإنارة، كما هو موضح في الشكل (6-4).

شكل 6-4 موزعات الهواء الطولية

ب- تراكيب سحب الهواء الراجع Return Air Terminal

يتم تركيب أدوات الهواء الراجع في كل غرفة أو ممر من البناية، وقد تكون هذه الأدوات سقفية أو جدارية أو أرضية، وقد تكون دائرية أو مربعة أو مستطيلة أو طولية، ويبين الشكل (6-5) بعض أنواع تراكيب الهواء الراجع.

6-6-2 خانقات الهواء Air Volume Rate Damper

وتعمل خانقات الهواء على التحكم بمعدل التدفق للهواء، ويتم التحكم بها إما يدوياً أو كهربائياً.

شباك هواء راجع سقفي

شباك هواء راجع جداري

شباك هواء راجع طولي بصورة زاوية

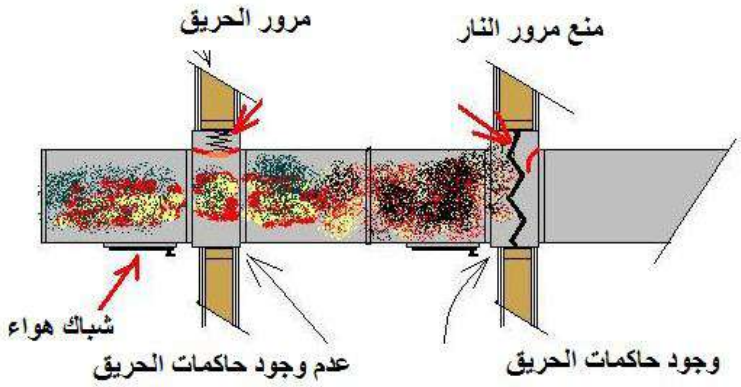
شباك هواء راجع جداري

شكل 6-5 تراكيب الهواء الراجع

3-6-6 حاكمات الحريق Fire Damper

وتستعمل في مجاري الهواء الرئيسة، الهدف منها منع انتشار النار داخل الأبنية بسبب تيارات الهواء، وتحتوي على نابض مثبت بقطعة معدنية قابلة للانصهار، فعند ارتفاع درجة الحرارة داخل المجرى تنصهر القطعة المعدنية وتغلق مجرى الهواء مانعة النار من الانتشار، كما مبين في الشكل (6-6).

أـ حاكمات الحريق



ب ـ أسلوب منع انتشار النار في مجرى الهواء

شكل 6-6 حاكمات الحريق

أسئلة الفصل السادس

س1: هواء يمر بمجرى هواء بمعدل $1.5\ m^3/s$، فإذا كانت أبعاد مجرى الهواء 0.3 m ارتفاعاً و0.5 m عرضاً، احسب القطر المكافئ لمجرى الهواء وخسائر الضغط، إذا كان طول مجرى الهواء 40 m.

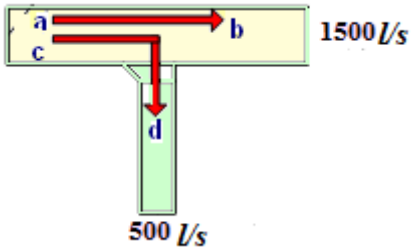
ج/ 420 mm ، 120 Pa

س2: هواء يدخل توسعاً مفاجئاً، فإذا كانت مساحة مقطع مجرى الهواء عند الخروج ضعف مساحة مقطع مجرى الهواء عند الدخول، وكانت سرعة الهواء بعد التوسع تساوي 12 m/s، احسب خسائر الضغط نتيجة مرور الهواء في التوسع المفاجئ.

ج/ 17.28 Pa

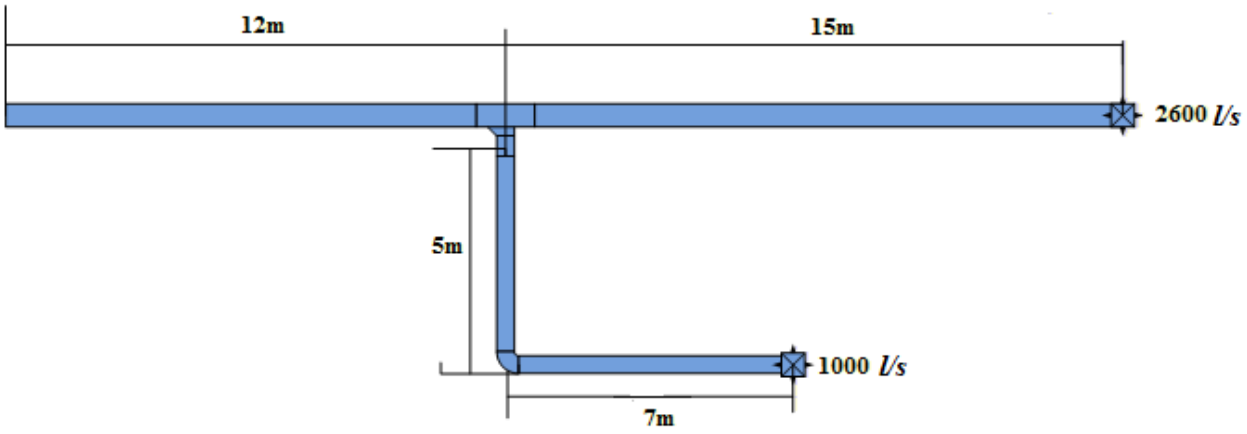
س3: جد أبعاد مقطع مجرى الهواء أدناه، إذا علمت أن أقل ارتفاع لمجرى الهواء الرئيس 30 cm، والسرعة القصوى 8 m/s، ثم جد خسائر الضغط بالتفرع d.

ج/ $(300 \times 830)mm$ ، $(300 \times 750)mm$ ، $(300 \times 360)mm$ ، 3.88 Pa



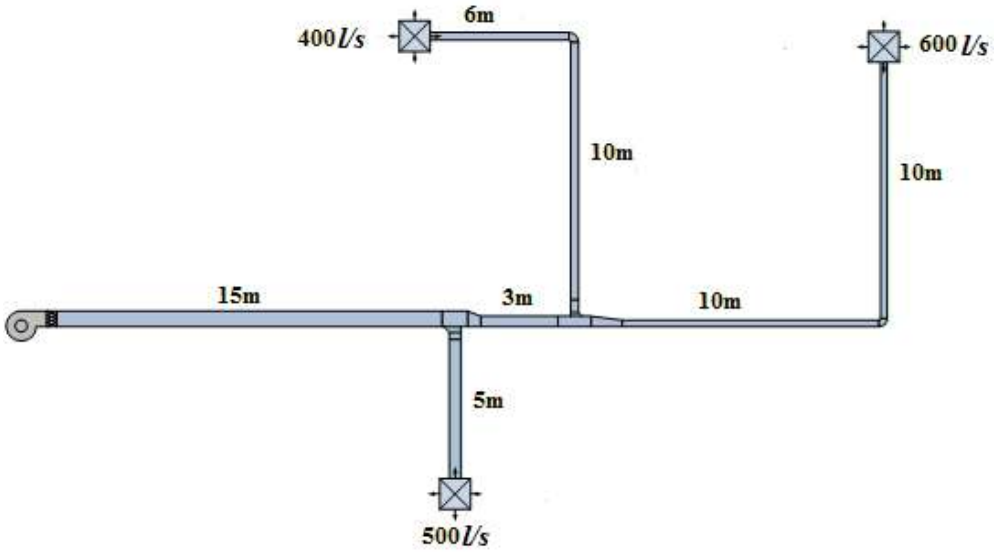
س4: احسب أبعاد وخسائر الضغط لمجرى الهواء الدائري المقطع، إذا علمت إن أقصى سرعة في مجرى الهواء الرئيس تساوي (10 m/s).

ج/ 40.5 Pa



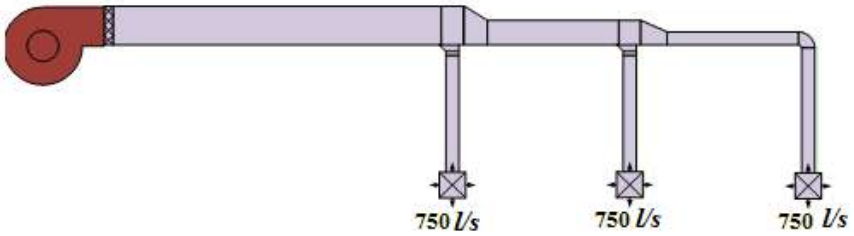
س5: جد أبعاد وخسائر الضغط في مجرى الهواء أدناه، بطريقة ثبوت الضغط، إذا علمت أن أقصى ارتفاع مسموح به لمجرى الهواء هو 30 cm، وان أقصى سرعة هي (6 m/s).

ج/ $(300 \times 830)mm$ ، $(300 \times 300)mm$ ، $(300 \times 450)mm$ ، $(300 \times 400)mm$
41 Pa



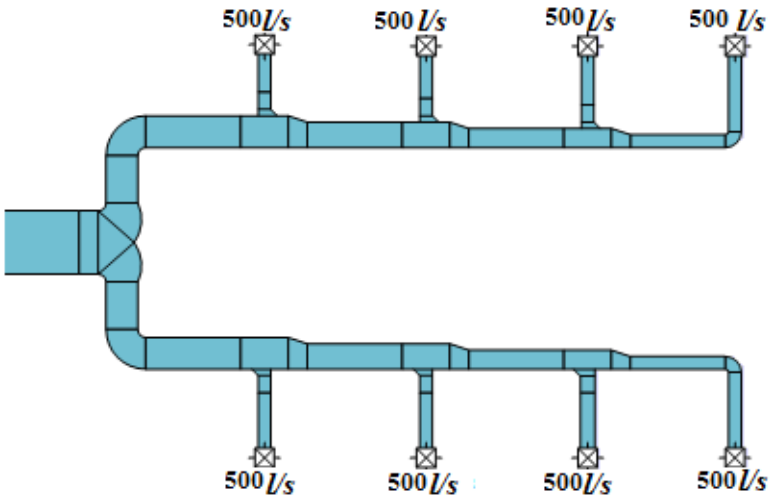
س6: جد أبعاد مجرى الهواء الدائري أدناه إذا علمت أن أقصى سرعة للهواء في المجرى الرئيس تساوي (9 m/s).

ج/ 560 mm ، 490 mm ، 470 mm



س7: جد أبعاد مجرى الهواء الدائري أدناه، إذا علمت أن أقصى سرعة للهواء في مجرى الهواء الرئيس تساوي (12 m/s).

ج/ 600 mm ، 500 mm ، 450 mm ، 390 mm ، 280 mm



جدول 6-2 القطر المكافئ لمجاري الهواء مستطيلة المقطع

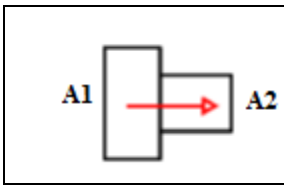
العرض mm	الارتفاع mm																			
	100	125	150	175	200	225	250	275	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	900
	القطر المكافئ																			
100	109																			
125	122	137																		
150	133	150	164																	
175	143	161	177	191																
200	152	172	189	204	219															
225	161	181	200	216	232	246														
250	169	190	210	228	244	259	273													
275	176	199	220	238	256	272	287	301												
300	183	207	229	248	266	283	299	314	328											
350	195	222	245	267	286	305	322	339	354	383										
400	207	235	260	283	305	325	343	361	378	409	437									
450	217	247	274	299	321	343	363	382	400	433	464	492								
500	227	258	287	313	337	360	381	401	420	455	488	518	547							
550	236	269	299	326	352	375	398	419	439	477	511	543	573	601						
600	245	279	310	339	365	390	414	436	457	496	533	567	598	628	656					
650	253	289	321	351	378	404	429	452	474	515	553	589	622	653	683	711				
700	261	298	331	362	391	418	443	467	490	533	573	610	644	677	708	737	765			
750	268	306	341	373	402	430	457	482	506	550	592	630	666	700	732	763	792	820		
800	275	314	350	383	414	442	470	496	520	567	609	649	687	722	755	787	818	847	875	
900	289	330	367	402	435	465	494	522	548	597	643	686	726	763	799	833	866	897	927	984
1000	301	344	384	420	454	486	517	546	574	626	674	719	762	802	840	876	911	944	976	1037
1100	313	358	399	437	473	506	538	569	598	652	703	751	795	838	878	916	953	988	1022	1086
1200	324	370	413	453	490	525	558	590	620	677	731	780	827	872	914	954	993	1030	1066	1133
1300	334	382	426	468	506	543	577	610	642	701	757	808	857	904	948	990	1031	1069	1107	1177
1400	344	394	439	482	522	559	595	629	662	724	781	835	886	934	980	1024	1066	1107	1146	1220
1500	353	404	452	495	536	575	612	648	681	745	805	860	913	963	1011	1057	1100	1143	1183	1260
1600	362	415	463	508	551	591	629	665	700	766	827	885	939	991	1041	1088	1133	1177	1219	1298
1700	371	425	475	521	564	605	644	682	718	785	849	908	964	1018	1069	1118	1164	1209	1253	1335
1800	379	434	485	533	577	619	660	698	735	804	869	930	988	1043	1096	1146	1195	1241	1286	1371
1900	387	444	496	544	590	663	674	713	751	823	889	952	1012	1068	1122	1174	1224	1271	1318	1405
2000	395	453	506	555	602	646	688	728	767	840	908	973	1034	1092	1147	1200	1252	1301	1348	1438
2100	402	461	516	566	614	659	702	743	782	857	927	993	1055	1115	1172	1226	1279	1329	1378	1470
2200	410	470	525	577	625	671	715	757	797	874	945	1013	1076	1137	1195	1251	1305	1356	1406	1501
2300	417	478	534	587	636	683	728	771	812	890	963	1031	1097	1159	1218	1275	1330	1383	1434	1532
2400	424	486	543	597	647	695	740	784	826	905	980	1050	1116	1180	1241	1299	1355	1409	1461	1561
2500	430	494	552	606	658	706	753	797	840	920	996	1068	1136	1200	1262	1322	1379	1434	1488	1589
2600	437	501	560	616	668	717	764	810	853	935	1012	1085	1154	1220	1283	1344	1402	1459	1513	1617
2700	443	509	569	625	678	728	776	822	866	950	1028	1102	1173	1240	1304	1366	1425	1483	1538	1644
2800	450	516	577	634	688	738	787	834	879	964	1043	1119	1190	1259	1324	1387	1447	1506	1562	1670
2900	456	523	585	643	697	749	798	845	891	977	1058	1135	1208	1277	1344	1408	1469	1529	1586	1696

تابع جدول 6-2 القطر المكافئ لمجاري الهواء مستطيلة المقطع

العرض mm	الارتفاع mm																			
	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900
	القطر المكافئ																			
1000	1093																			
1100	1146	1202																		
1200	1196	1256	1312																	
1300	1244	1306	1365	1421																
1400	1289	1354	1416	1475	1530															
1500	1332	1400	1464	1526	1584	1640														
1600	1373	1444	1511	1574	1635	1693	1749													
1700	1413	1486	1555	1621	1684	1745	1803	1858												
1800	1451	1527	1598	1667	1732	1794	1854	1912	1968											
1900	1488	1566	1640	1710	1778	1842	1904	1964	2021	2077										
2000	1523	1604	1680	1753	1822	1889	1952	2014	2073	2131	2186									
2100	1558	1640	1719	1793	1865	1933	1999	2063	2124	2183	2240	2296								
2200	1591	1676	1756	1833	1906	1977	2044	2110	2173	2233	2292	2350	2405							
2300	1623	1710	1793	1871	1947	2019	2088	2155	2220	2283	2343	2402	2459	2514						
2400	1655	1744	1828	1909	1986	2060	2131	2200	2266	2330	2393	2453	2511	2568	2624					
2500	1685	1776	1862	1945	2024	2100	2173	2243	2311	2377	2441	2502	2562	2621	2678	2733				
2600	1715	1808	1896	1980	2061	2139	2213	2285	2355	2422	2487	2551	2612	2672	2730	2787	2842			
2700	1744	1839	1929	2015	2097	2177	2253	2327	2398	2466	2533	2598	2661	2722	2782	2840	2896	2952		
2800	1772	1869	1961	2048	2133	2214	2292	2367	2439	2510	2578	2644	2708	2771	2832	2891	2949	3006	3061	
2900	1800	1898	1992	2081	2167	2250	2329	2406	2480	2552	2621	2689	2755	2819	2881	2941	3001	3058	3115	3170

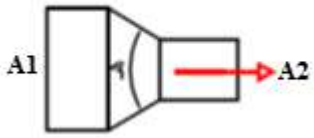
جدول 6-3 معامل الاحتكاك في تراكيب مجاري الهواء

جدول 6-3 أ تقلص مفاجئ



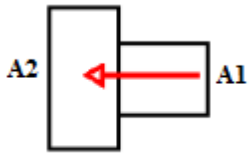
$\frac{A_2}{A_1}$	0.25	0.4	0.55	0.65
C	0.37	0.28	0.19	0.12

جدول 6-3 ب تقلص تدريجي



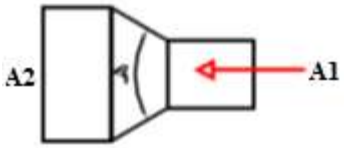
هـ	30°	45°	60°
C_1	0.02	0.04	0.07

جدول 6-3 ج توسع مفاجئ



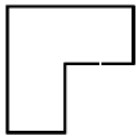
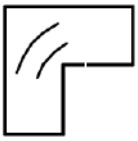
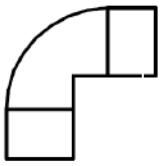
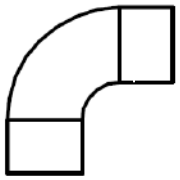
$\frac{A_1}{A_2}$	0.25	0.4	0.55	0.65
C	0.56	0.36	0.20	0.09

جدول 6-3 د توسع تدريجي

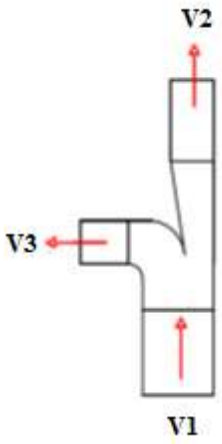


هـ	30°	45°	60°
C_2	0.6	0.8	1

جدول 6-3 هـ انحناء متعدد الإشكال

 هـ	 د	ج	 ب	 أ
C_1=1.25	0.72	0.35	1.22	0.67

جدول 6-3 و تفرع

	$\frac{v_2}{v_1}$	C	$\frac{v_3}{v_1}$	C_3×C
	0.6	0.34	0.6	×3.5
	0.8	0.18	0.8	×1.8
	1.0	0.09	1.0	×1.0
	1.2	0.05	1.2	×1.0

الفصل السابع

الكهرومغناطيسية والمحولات

Electromagnetism & Transformers

الكهرومغناطيسية والمحولات

Electromagnetism & Transformers

1-7 مقدمة Introduction

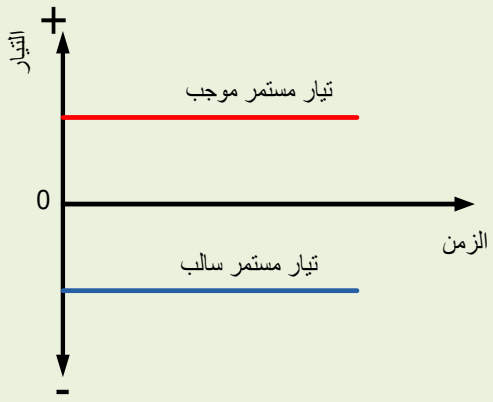
بعد أن تم دراسة الأجزاء الميكانيكية الرئيسة لمنظومة التثليج الانضغاطية، لابد من دراسة الملحقات الإضافية، وفي مقدمتها كهربائية منظومة التثليج. ففي دراسة سابقة (المرحلة الأولى) تم التركيز على أسس ومكونات الدوائر الكهربائية، إما في هذا الفصل فسيتم التطرق لمراجعات بعض الأسس الكهربائية وخصوصاً التيار المتناوب، المغناطيسية الكهربائية، ومبدأ عمل المحركات الكهربائية مع التركيز على المحولات، المرحلات والمحركات الكهربائية المستخدمة في أنظمة التثليج.

2-7 التيار الكهربائي Electric Current

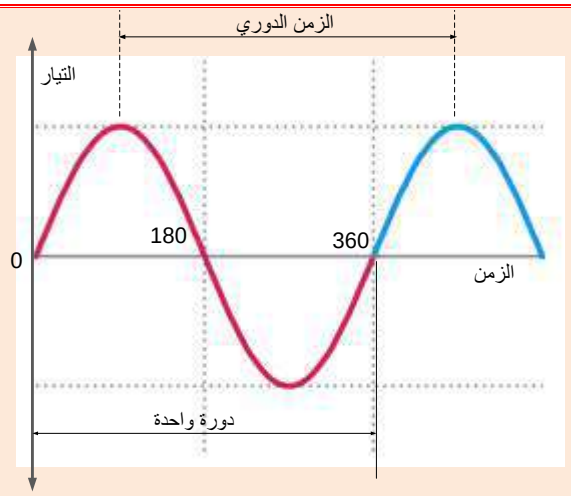
التيار الكهربائي هو سريان الإلكترونات في الدوائر الكهربائية، ويقسم إلى نوعين هما التيار المستمر Direct Current (DC) والتيار المتناوب Alternating Current (AC)، التيار المستمر هو التيار الذي يأخذ اتجاهاً ثابتاً مع الزمن حتى وإن تغيرت قيمته، لذا فالتيار المستمر قد يكون سالباً أو موجباً، وكما هو مبين بالشكل (7-1). ومن أهم مصادره البطاريات ومولدات التيار المستمر والتيار المستمر الناتج عن تحويل التيار المتناوب، ويستخدم التيار المستمر في بعض تطبيقات التثليج وتكييف الهواء من أهمها دوائر التحكم الإلكترونية، أجهزة التحكم عن بُعد، دوائر حساسات القياس لدرجة الحرارة والضغط والرطوبة.

إما التيار المتناوب (AC) فهو التيار الذي يتولد على هيأة موجة جيبيه Sine Wave، حيث تتغير قيمته الآنية واتجاهه بين سالب وموجب خلال دورة واحدة، وكما هو مبين في الشكل (7-2). ومن الشكل يمكن ملاحظة إن القيمة والاتجاه للتيار متغيران آنياً، والتغير يأخذ شكل الدالة الجيبية المتكررة وهي موجة التيار وكذلك تكون موجة الجهد الكهربائي. إن الزمن المستغرق للدورة الواحدة يسمى الزمن الدوري، **والزمن الدوري** هو الزمن بالثانية بين نقطتين متماثلتين على موجة التيار. إما مقلوب الزمن الدوري فيسمى التردد، **والتردد Frequency** هو عدد الدورات التي يعملها التيار المتردد بزمن مقداره ثانية واحدة، ويقاس التردد بوحدات (دورة /ثانية) أو ما يسمى هرتز Hz، من الشكل (7-2) يلاحظ إن قيمة الجهد أو التيار يزداد من صفر إلى أعلى قيمة ثم يقل مرة أخرى إلى الصفر وبعدها يزداد في الاتجاه العكسي إلى أعلى قيمة وبعدها يعود إلى الصفر. إن هذا التموج يحدث خمسين مرة بالثانية إذا كان تردد المصدر (50 Hz)، أي أن زمن الدورة الواحدة هو 20 ملي ثانية كما هو في الشبكة الوطنية

العراقية والمصرية، في حين إذا كان التردد (60 Hz) كما في المملكة العربية السعودية وبعض دول الخليج فإن عدد الدورات تكون 60 دورة بالثانية. وتُعد محطات توليد الطاقة الكهربائية بمختلف سعاتها من المصادر الأساسية لتوليد التيار المتناوب. ففي محطات التوليد الكبيرة يتم إنتاج التيار الكهربائي بجهد كبير ليتم نقله خلال خطوط النقل الكهربائية، ومن هذه الخطوط يتم تجهيز المستخدم بعد تخفيض الجهد الكهربائي حسب الاستخدام، ومنها على سبيل المثال في بلدنا العراق إما أحادي الطور بفرق جهد مقداره 220 فولت أو ثلاثي الطور بفرق جهد مقداره 380 فولت.



شكل 7-1 التيار المستمر



شكل 7-2 موجة التيار المتناوب

7-2-1 التيار المتناوب أحادي الطور Single-Phase AC

يصل التيار المتناوب إلى أعلى قيمة موجبة لفرق الجهد تساوي 200 فولت ويسمى حينها I_{max} في ربع الدورة، بينما يصل إلى أعلى قيمة سالبة له عند ثلاثة أرباع الدورة، وهو مبين في الشكل (7-3) إلا إن التيار المتناوب يعرف بقيمته الفعالة (I) والتي ترتبط بالقيمة القصوى من خلال العلاقة:

$$\mathbf{I = 0.707 \times I_{max}} \qquad (7\text{-}1)$$

وكذلك فرق الجهد الفعال يرتبط بفرق الجهد الأقصى من خلال العلاقة:

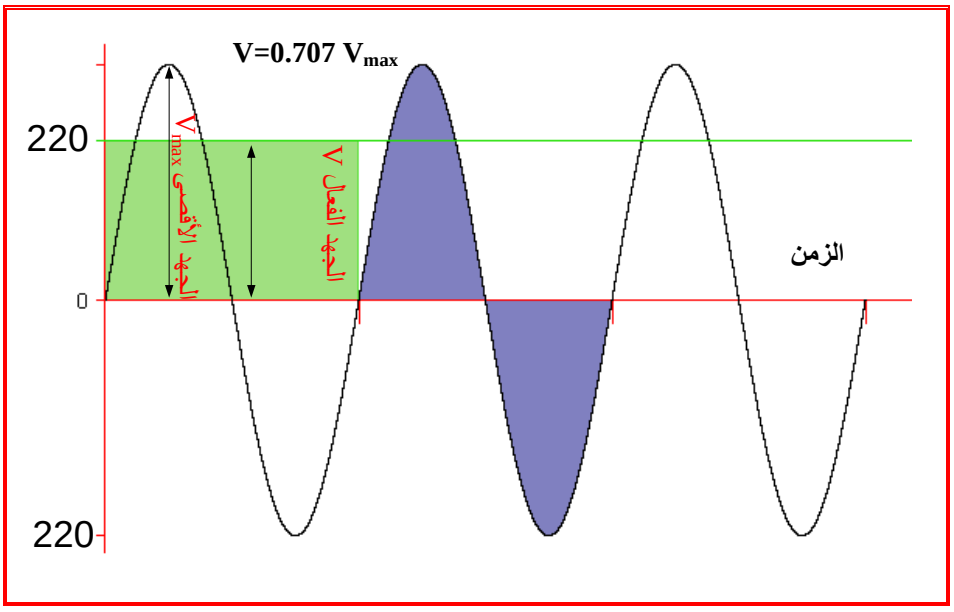
$$\mathbf{V = 0.707 \times V_{max}} \qquad (7\text{-}2)$$

ومن الجدير بالذكر إن قيمة فرق الجهد المساوي إلى 220 فولت هو الجهد الفعال لمصدر التيار المتناوب وليس فرق الجهد الأقصى، ويمكن حساب فرق الجهد الأقصى للتيار أحادي الطور عن طريق قسمة فرق الجهد الفعال والذي يساوي 220 فولت مقسوماً على 0.707 ، ويكون الناتج 311 فولت.

إما القدرة الفعالة P والتي تكون وحدتها الواط W فيمكن حسابها من المعادلة الآتية:

$$P = I \times V \times \cos(\phi) \qquad (7\text{-}3)$$

حيث أن ϕ هي زاوية الطور بين موجـــة التيار وموجـــة الجهد، يكون المقدار $\cos(\phi)$ (معامل القدرة) يساوي واحد في التيار المستمر، لأنه لا يوجد فرق بالطور بين التيار والجهد أي أن ϕ تساوي صفر.

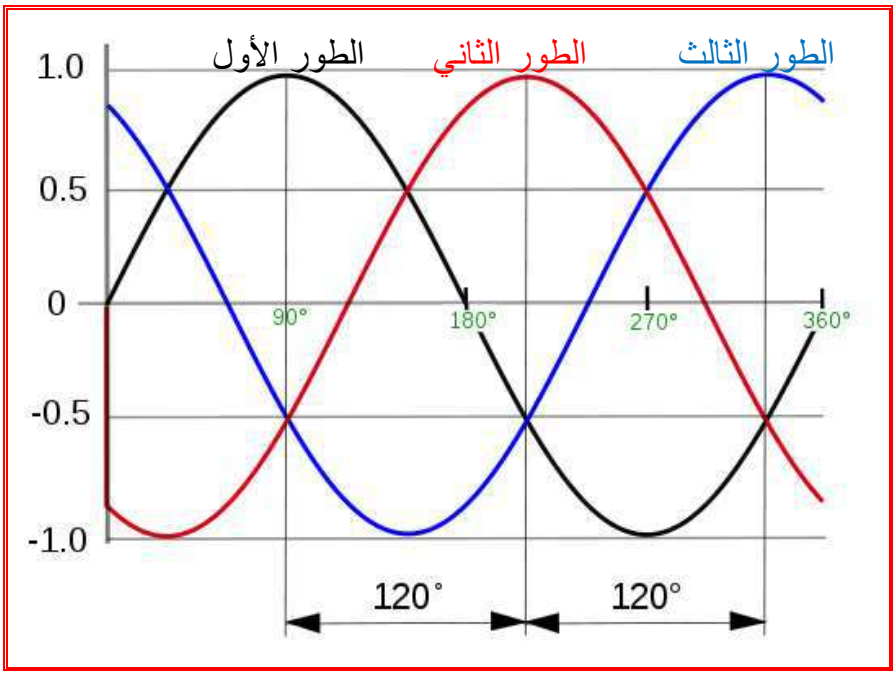


شكل 7-3 مصدر وموجة تيار متناوب أحادي الطور

ومن الأحمال الكهربائية التي تستخدم التيار المتناوب أحادي الطور الأجهزة المنزلية ومنها الثلاجة، المجمدة، مكيفات الغرف بنوعيها الشباكي والمنفصلة، برادات الماء، وغيرها.

7-2-2 التيار المتناوب ثلاثي الطور Three-Phase AC

إن هذا النوع من التيار المتناوب يتكون من ثلاثة خطوط لجهود متناوبة تمتلك نفس التردد والقيمة العظمى، لكن أطوارها متعاقبة عن بعضها بزاوية مقدارها 120°، وكما هو مبين في الشكل (7-4). يوصل التيار المتناوب ثلاثي الطور للمستهلك بثلاثة خطوط. ويكون ربط التيار ثلاثي الطور بنوعين من الربط هما التوصيل النجمي Star Connection أو التوصيل المثلثي Delta Connection.



شكل 7-4 تيار متناوب ثلاثي الطور

1- التوصيل النجمي Star Connection (Y)

كما هو مبين بالشكل (7-5) فإن التوصيل النجمي (Y) يتم من خلال تجميع النهايات للخطوط الخارجة من ملفات المولد في نقطة واحدة مشتركة يطلق عليها نقطة التعادل Neutral Point، وعادةً يتم تأريض هذه النقطة، إما بداية الأطراف فإنها توصل بالأحمال بموصلات تدعى الخطوط.

إن الجهد الكهربائي بين أي من الخطوط الثلاثة والخط المتعادل Neutral يسمى جهد الطور Phase voltage ويرمز له V_{ph} ،إما الجهد بين أي خطين من الخطوط الثلاثة فيسمى جهد الخط Line Voltage ويرمز له بالرمز V_L ، كما إن التيار المار في أي من ملفات المولد يسمى تيار الطور Phase Current ويرمز له I_{ph} وكذلك التيار المار بأي خط يسمى تيار الخط Line Current ويرمز له I_L ، وكما هو موضح بالشكل (7-5)، واعتماداً على المبادئ الأساسية لعلم الكهرباء، يمكن الاستنتاج بأن تيار الطور I_{ph} يساوي تيار الخط I_L.

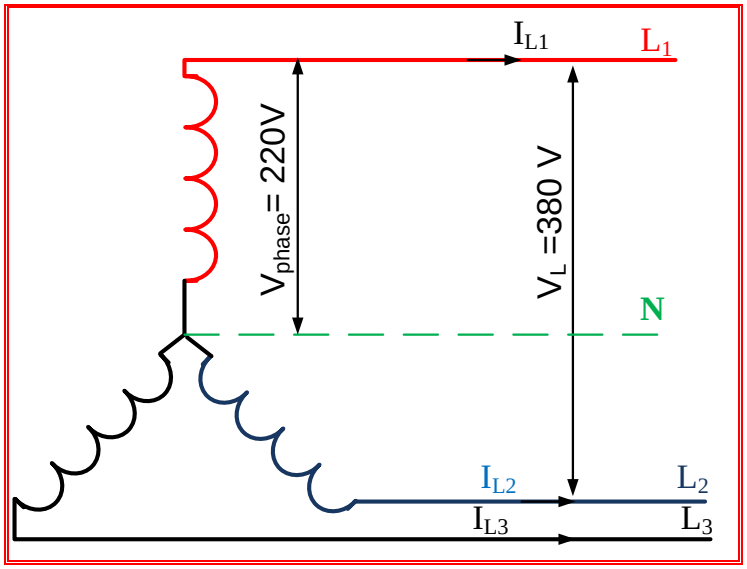
إما العلاقة بين جهد الخط V_L وجهد الطور V_{ph} فتكون العلاقة الآتية:

$$\boldsymbol{V_L = \sqrt{3} V_{ph}} \qquad (7\text{-}4)$$

وبذلك تكون القدرة Power (P) المنقولة هي:

$$\boldsymbol{P = \sqrt{3} \times I_L \times V_L \times cos\emptyset} \qquad (7\text{-}5)$$

حيث أن cosφ هو معامل القدرة الذي يعتمد على طبيعة الحمل الكهربائي (مقاومة أو ملف أو مكثف).



شكل 7-5 التوصيل النجمي للمولدات

2- التوصيل المثلثي (دلتا) (Δ) Delta Connection

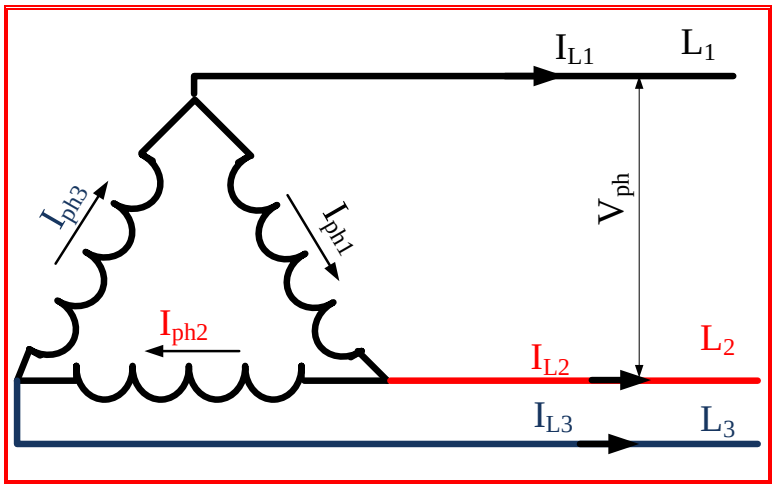
ويكون فيه ربط الملفات الكهربائية على شكل مثلث، ويلاحظ عدم احتواء هذا التوصيل على نقطة مشتركة كما هو الحال في التوصيل النجمي، وكما هو مبين في الشكل (7-6). وفي هذا التوصيل يتساوى جهد الخط مع جهد الطور ($V_{ph} = V_L$) ومن الشكل واعتماداً على قانون كيرشوف تكون العلاقة بين قيم تيار الخط وتيار الطور كما يأتي:

$$I_L = \sqrt{3} I_{ph} \qquad (7\text{-}6)$$

كما إن القدرة تحسب من المعادلة (7-5) المذكورة سابقاً:

$$P = \sqrt{3} \times I_L \times V_L \times cos\emptyset \qquad (7\text{-}7)$$

كما إن استخدامات التيار المتناوب AC واسعة جداً ومنها أجهزة التثليج والتكييف، محركات التيار المتناوب في مجالاتها المختلفة وغيرها من الأجهزة الكهربائية.



شكل 7-6 توصيل دلتا للتيار ثلاثي الطور

3-7 المغناطيسية Magnetism

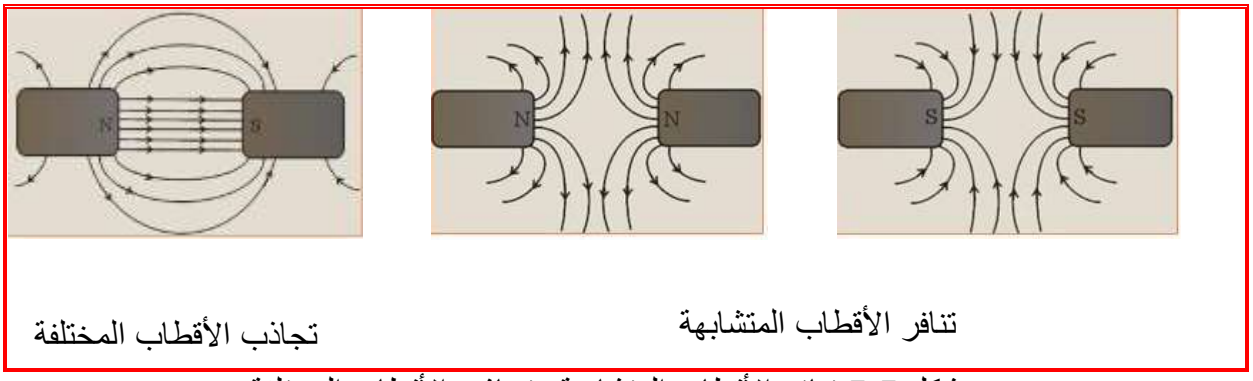
المغناطيس Magnet تسمية إغريقية قديمة أطلقت على بعض القطع من المواد الطبيعية التي وجدت بالقرب من مدينة مغنيسيا Magnesia في آسيا الوسطى. لهذه المواد القابلية على جذب أجزاء من المادة نفسها أو القطع الحديدية نحوها، لذلك سُميت المواد التي تمتلك خاصية الجذب بالمواد المغناطيسية نسبة إلى مدينة مغنيسيا. كما إن هذه المواد تمتلك خاصية أخرى، فعند تعليق قضيب من المغناطيس بشكلٍ حرٍ فإنه يستقر متجهاً للشمال والجنوب الجغرافي. لذلك استخدمت هذه المواد في صنع البوصلة.

وحديثاً استخدمت سبائك الحديد مع الكوبالت، النيكل، والألمنيوم لصنع مغناطيس قوي دائم المغنطة. كما إن المواد بشكل عام قُسمت إلى مواد مغناطيسية وغير مغناطيسية اعتماداً على انجذابها للمغناطيس، وتُعد المواد التي يدخل الحديد في تركيبها مغناطيسية، إما تلك التي لا يدخل الحديد في تركيبها فتعتبر مواد غير مغناطيسية.

ومن الخواص الأساسية للمواد المغناطيسية إن لها قطبان إحداهما شمالي North (N) والثاني جنوبي South (S) مهما صغر حجم المغناطيس ولا يمكن الحصول على قطب مغناطيسي معزول، فحتى إذا تم تفتيت المغناطيس إلى أجزاء فإن لكل جزء سيكون قطبان كما في المغناطيس الأصلي، كما إن التأثير المغناطيسي أكبر ما يمكن عند الأقطاب وأقل ما يمكن عند منتصف المغناطيس.

ومن المعروف إن الأقطاب المتشابهة للمغناطيس تتنافر في حين أن الأقطاب المختلفة تتجاذب، وكما مبين في الشكل (7-7)، وتعتمد قوة التجاذب أو التنافر على قوة الأقطاب المغناطيسية. وقوة الأقطاب المغناطيسية يعبر عنها بعدد من خطوط القوى التي تتجه دائماً من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي (المجموع الكلي لخطوط المجال المغناطيسي في قطعة ممغنطة)، وتسمى هذه القوى بالفيض

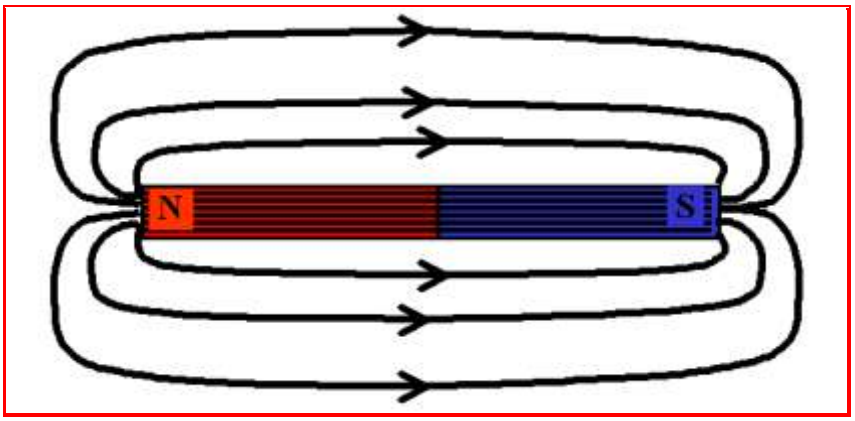
المغناطيسي Magnetic Flux ويرمز له بالحرف Φ، ويقاس بوحدة تسمى الويبر (Weber) والشكل (7-8) يبين الخطوط المغناطيسية، إذ أن هذه الخطوط وهمية ومغلقة ولا تتقاطع مع بعضها البعض. إن هذه الخطوط الوهمية التي تتجه من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي تسمى خطوط المجال المغناطيسي، ولهذا فإن المجال المغناطيسي هو المنطقة التي تظهر فيها آثار القوة المغناطيسية، ويتولد المجال المغناطيسي من خطوط المغناطيس الطبيعي، أو من موصل يمر فيه تيار كهربائي أو جسم مشحون متحرك.



شكل 7-7 تنافر الأقطاب المتشابهة وتجاذب الأقطاب المختلفة

ومن أهم خواص الخطوط المغناطيسية ما يأتي:

1. خطوط القوى المغناطيسية الخارجة من الجسم تتجه من القطب الشمالي إلى القطب الجنوبي، إما داخل الجسم فإن الخطوط تكمل مساراتها بشكل متوازٍ من القطب الجنوبي إلى القطب الشمالي. أي أنها خطوط متصلة وكل خط فيها له مسار مقفل.
2. عدم تقاطع خطوط القوى المغناطيسية إطلاقاً.
3. قوى التجاذب والتنافر بين الأقطاب المغناطيسية ناتجة عن تفاعل خطوط القوى المغناطيسية للأقطاب.



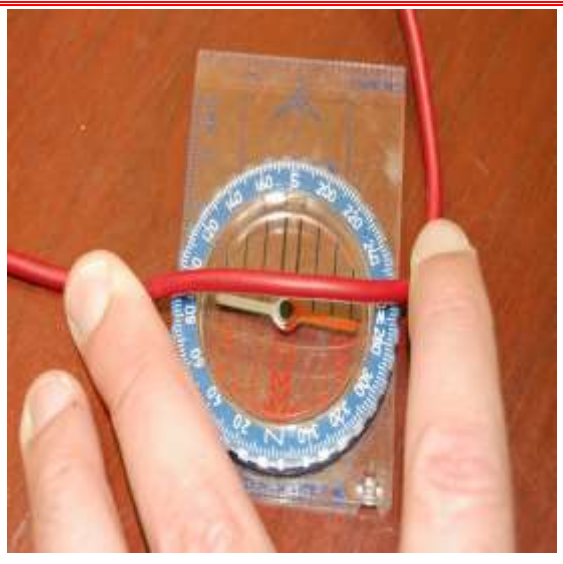
شكل 7-8 خطوط القوى المغناطيسية

أما شدة أو قوة المجال المغناطيسي عند نقطةٍ ما فتعرف بأنها عدد خطوط القوى المغناطيسية المتدفقة خلال وحدة المساحة (المتر المربع)، وتسمى الكثافة المغناطيسية Magnetic Density، ويرمز لها بالحرف B، وتقاس بوحدة تسمى تيسلا Tesla، وهي ويبر على المتر المربع.

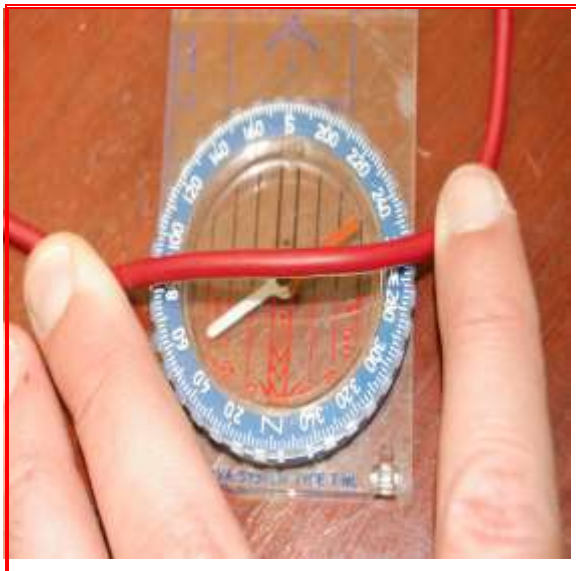
كما إن قدرة المادة على تمرير وتركيز خطوط القوى المغناطيسية، فيعبر عنها بالنفاذية المغناطيسية Magnetic Permeability فالمواد المغناطيسية يكون لها معامل نفاذية عالياً وذلك لكون معارضتها للخطوط المغناطيسية قليلة، على العكس من المواد غير المغناطيسية التي يكون لها معامل نفاذية منخفض.

4-7 المغناطيسية الكهربائية Electric Magnetism

عندما توضع إبرة مغناطيسية (وهي عبارة عن إشارة تبين قراءة المغناطيسية) بالقرب من موصل يمر به تيار كهربائي، يلاحظ انحراف الإبرة باتجاه يعتمد على اتجاه التيار المار بالموصل بسبب تولد مجال مغناطيسي Magnetic Field وهذا المجال يولد قوة تؤثر في الإبرة مسببة انحرافها، وتسمى هذه القوة بالقوة المغناطيسية Magnetic Force، وكما هو مبين في الشكل (7-9). هذه الظاهرة تتماشى مع اكتشاف العالم الدنماركي أورستد Orsted، الذي وجد تغير اتجاه البوصلة عند تقريبها من موصل يمر فيه تيار كهربائي مشابهاً للتغير الذي يحصل عند تقريب مغناطيس من البوصلة. وبذلك يمكن الاستدلال على أن للتيار الكهربائي تأثير مغناطيسي.



ثبوت الإبرة المغناطيسية عند عدم مرور تيار كهربائي

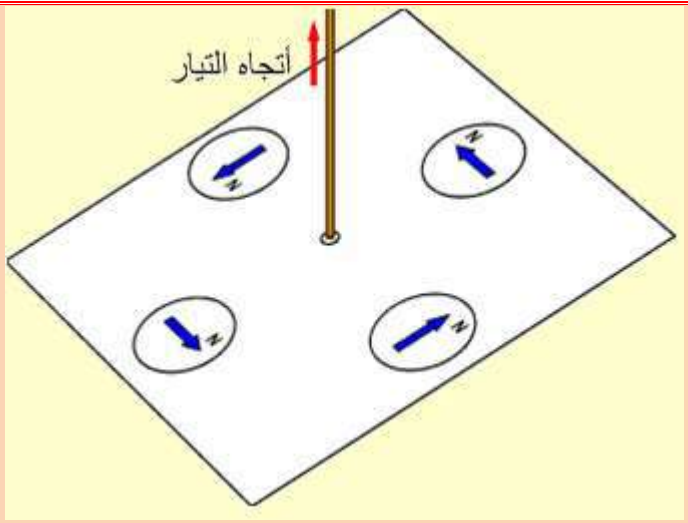


تحرك الإبرة المغناطيسية عند مرور التيار الكهربائي

شكل 7-9 تحرك الإبرة المغناطيسية عند مرور التيار في السلك الكهربائي

ويمكن إثبات تولد المجال المغناطيسي عملياً من خلال توصيل مصدر كهربائي (بطارية) بسلك كهربائي يمر خلال قطعة ورقية موضوعة بمستوى أفقي بحيث يكون السلك عمودياً عليها، كما هو مبين بالشكل (7-10 أ) وتنشر برادة حديد على الورقة، فعند مرور التيار يلاحظ إن البرادة تأخذ مسارات دائرية حول السلك. إن المجال المتولد نتيجة مرور التيار في السلك أو الملف الكهربائي، يمكن رسمه باستخدام الإبرة المغناطيسية ووضعها في مواضع مختلفة بالقرب من ذلك الموصل وتأشير اتجاه الإبرة في كل موضع من المواضع، ومن ثم رسم شكل المجال، كما هو مبين بالشكل (7-10 ب). ويتضح من الشكل إن خطوط القوى المغناطيسية تكوّن دوائر متحدة المركز حول السلك وتتخذ اتجاهاً عكس اتجاه عقرب الساعة.

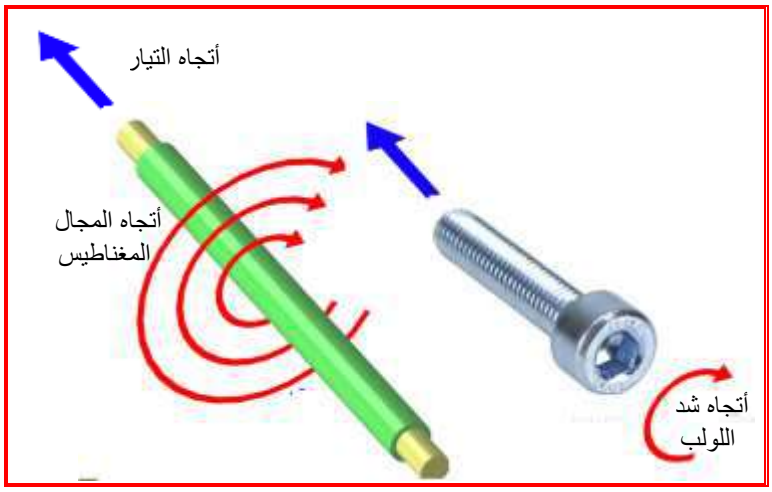
أ- استخدام برادة الحديد في تحديد المجال المغناطيس



ب- استخدام الإبرة المغناطيسية في تحديد المجال المغناطيس

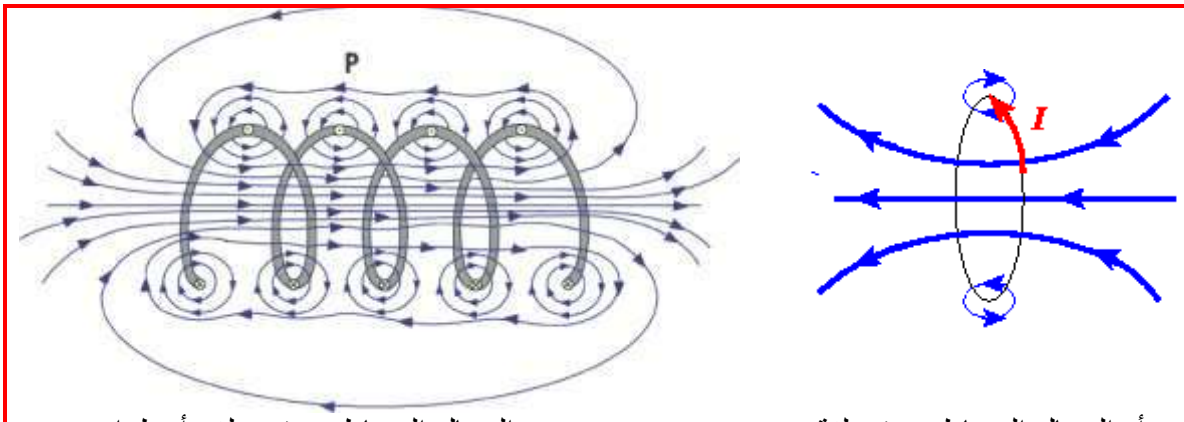
شكل 7-10 تولد المجال المغناطيسي من مرور التيار الكهربائي

إن اتجاه المجال المغناطيسي الناتج من مرور التيار الكهربائي في موصل يمكن تحديده اعتماداً على قاعدة اللولب، التي تتبع القاعدة التالية (حدد اتجاه التيار بوضع لولب يؤشر رأسه باتجاه التيار، فإن اتجاه المجال المغناطيس الناتج عن مرور التيار في السلك يكون باتجاه شد اللولب)، وكما مبين في الشكل (7-11).



شكل 7-11 قاعدة اللولب لتحديد اتجاه المجال المغناطيسي

إما إذا كان الموصل ملفاً بلفة واحدة أو أكثر، فيمكن اتباع القاعدة ذاتها عن طريق تحديد اتجاه التيار واتباع قاعدة اللولب ثم تعميم القاعدة على اللفة، وكما هو مبين في الشكل (7-12 أ). ويمكن تعميم القاعدة على عدد من اللفات، وكما هو مبين في الشكل (7-12 ب) إذ يمر عدد كبير من خطوط القوى المغناطيسية داخل قلب الملف موازياً لمحوره. وعند مرور التيار الكهربائي في ملف يكون لمجاله المغناطيسي قطبان شمالي N وجنوبي S يتحددان بحسب اتجاه التيار في الملف، وفي الاستخدامات العملية للملفات يكون قلب الملف من المواد المغناطيسية مثل الحديد أو سبائكه لزيادة قوة المجال المغناطيسي.



أ- المجال المغناطيس في لفة واحدة

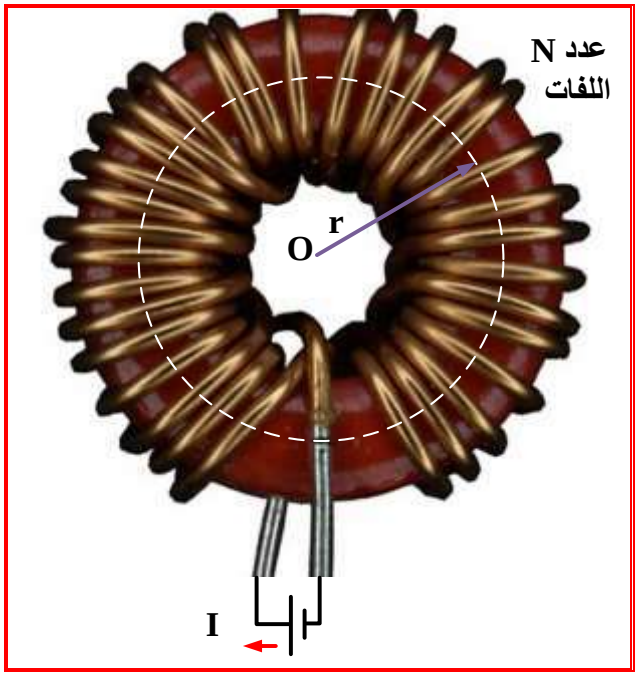
ب- المجال المغناطيس في ملف أسطواني

شكل 7-12 مجال مغناطيسي متولد من مرور تيار في ملف

أما الشكل (7-13) الذي يبين المجال المغناطيسي المتولد عن مرور تيار كهربائي في ملف حلقي، إذ أن شدة المجال المغناطيسي المتولد داخل قلب الملف تتغير بتغير نصف قطر الملف، وبما أن شدة المجال هي القوة الدافعة المغناطيسية لوحدة الطول من مسار المجال المغناطيسي المتولد نتيجة مرور

التيار في الملف، فإنها للملف الحلقي ستكون مساوية للقوة الدافعة المغناطيسية مقسومة على محيط الملف $(2\pi r)$.

إن ما تمت الإشارة إليه في أعلاه يمثل مرور تيار كهربائي مستمر Direct Current، لكن عند مرور تيار متناوب AC في ملف فسيولد فيضاً مغناطيسياً متغير القيمة والاتجاه مما ينتج عنه توليد قوة كهرومغناطيسية في الملف باتجاه تسبب منع تغير الفيض المغناطيسي. إن هذه الظاهرة تسمى الحث الذاتي Self-Inductance للملف وينتج عنها قوة دافعة كهربائية في الملف.



شكل 7-13 المجال المغناطيسي المتولد من مرور التيار في الملف الحلقي

7-4-1 قانون فراداي Faraday's Law

نشر العالم فراداي عام 1832م، وضعاً عاماً سميّ فيما بعد باسمه وهو قانون القوة الدافعة الكهربائية (ق. د. ك.) في حلقة أو ملف عند حركته في مجال مغناطيسي أو عند تغير المجال المغناطيسي مع الزمن. لقد ثبت تجريبياً أن (ق. د. ك.) المحتثة في دائرة مقفلة تساوي معدل تغير الفيض المغناطيسي للمجال مع الزمن بإشارة معكوسة.

عند احتواء الملف الذي تحتث فيه (ق. د. ك.) على عدد من اللفات من الواضح جداً أن هذه اللفات يمكن اعتبارها كلفات مستقلة عن بعضها البعض مربوطة على التوالي، فتكون (ق. د. ك.) المحتثة في مجموعها عبارة عن (ق. د. ك.) المتولدة في لفة واحدة منها مضروبة في عددها. ولهذا يصبح قانون فراداي بالصيغة الآتية:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{N}\frac{\Delta\boldsymbol{\varphi}}{\Delta\boldsymbol{t}} \qquad (7\text{-}8)$$

إذ أن:

E	القوة الدافعة الكهربائية المحتثة	فولت	V
N	عدد اللفات	-	
$\Delta\varphi$	التغير بالفيض المغناطيسي	ويبر	Wb
Δt	التغير بالزمن	ثانية	s

الإشارة السالبة في القانون تعني أن اتجاه (ق. د. ك.) المحتثة يعاكس التغير في الفيض المغناطيسي الذي سبب حثها في اللفة.

مثال 7-1

ملف يحتوي على 1200 لفة، يقطع لفاته فيضاً مقداره $400\ \mu Wb$ ، ينعكس هذا الفيض بزمن مقداره 0.1 sec، احسب معدل (ق. د. ك.) المحتثة في الملف.

الجواب

إن الفيض المغناطيسي يتناقص من $400\ \mu Wb$ إلى الصفر ومن ثم يتزايد من الصفر إلى $400\ \mu Wb$ بالاتجاه المعاكس، لهذا فإن مقدار التغير في الفيض المغناطيسي بنفس الاتجاه يساوي $-800\ \mu Wb$

$$\mathrm{E} = -\mathrm{N}\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

$$\mathrm{E} = -1200 \times \frac{-800\times10^{-6}}{0.1} = 9.6\ \mathrm{V}$$

5-7 دوائر المحثات Inductance Circuits

1-5-7 المحاثة الذاتية Self-Inductance

يعرف المحث بأنه الأداة التي تخزن الطاقة في مجاله المغناطيسي، ويمكن عدَ المحث بأنه المكافئ المغناطيسي للمتسعة. إن الملفات البسيطة والملفات اللولبية هي أمثلة على المحثات.

لقد أوضح العالم فارداي العلاقة بين قيمة الفولتية المحتثة في موصل وتغير الفيض المغناطيسي حسب القانون الذي سمي باسمه، كما أن الفيض المغناطيسي المتغير المحيط بالموصل يمكن إنتاجه بتيار كهربائي متغير في ذلك الموصل، لذا يمكن إيجاد علاقة مباشرة تربط الفولتية المحتثة والتيار المتغير،

يدعى ثابت التناسب بين هاتين الكميتين بالمحاثة ويرمز له بالرمز (**L**) ووحدة قياسها الهنري Henry (H).

إن المحاثة الذاتية ذات أهمية كبيرة في الدوائر الكهربائية، حيث لها خواصاً مفيدة تستطيع خزن الطاقة في المجال المغناطيسي مؤقتاً ثم إعادة تزويد الدائرة بها في وقت لاحق، لذلك تستخدم بكثرة وخصوصاً في دوائر التيار المتناوب.

2-5-7 ربط المحثات

إن مقدار المحاثة المكافئة لمجموعة من المحثات مربوطة على التوالي هي مجموع مقادير تلك المحثات، وهي مشابهة لمقدار المقاومة المكافئة لمجموعة من المقاومات.

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \ldots\ldots \qquad (7\text{-}9)$$

أما المحثات المربوطة على التوازي فيكون مقدار مقلوب المحاثة المكافئة هو مجموع مقلوب المحثات، كما هو الحال في ربط المقاومات على التوازي.

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \qquad (7\text{-}10)$$

3-5-7 المحاثة التبادلية

إذا وُضِعت دائرتان قرب بعضهما البعض وكان الفيض المغناطيسي الناتج من إحداهما يقطع الدائرة الأخرى، يدعى الفيض المشترك بين الدائرتين بالفيض التبادلي Mutual Flux وتدعى الدائرتان بأنهما دائرتان متقارنتان Coupled Circuits، إذا تغير التيار في الدائرة الأولى، فإن الفيض الناتج عن هذا التيار يتغير أيضاً، وحيث أن هذا الفيض (أو جزء منه) يقطع الدائرة الثانية أيضاً، لذا فإن قوة دافعة كهربائية (ق. د. ك.) تتولد في الدائرة الثانية، ويقال عن ذلك بأن هنالك محاثة تبادلية بين الملفين. يرمز للمحاثة التبادلية بالحرف (M) ووحدة قياسها هي نفس وحدة قياس المحاثة أي هنري (H).

$$M = k\sqrt{L_1 \times L_2} \qquad (7\text{-}11)$$

إذ أن k هو معامل الاقتران أو معامل الربط بين الملفين.

إن ربط ملفين على التوالي يؤدي إلى تكون محاثة تعادل مجموع محاثتيهما الذاتيتين، أما إذا كان بين المحثين فيضاً مشتركاً أي كان بينهما محاثة تبادلية بالإضافة إلى محاثتيهما ورُبطا على التوالي فإن هذا الربط يعتمد على اتجاه وضع نهايتي المحثين. هنالك حالتان في الربط، الحالة الأولى يكونان

باتجاه واحد، والحالة الثانية يكونان باتجاهين مختلفين. في الحالة الأولى يدعى الربط التعاضدي والثانية بالربط التعاكسي.

لذا فإن المحاثة المكافئة في حالة الربط التعاضدي تساوي مجموع المحثين الذاتيين للملفين مضافاً إليهما ضعف المحاثة التبادلية بينهما

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M \qquad (7\text{-}12)$$

أما إذا رُبطَ الملفان ربطاً تعاكسياً فإن قطبية (ق. د. ك.) المحتثة تبادلياً بينهما تعاكس (ق. د. ك.) المرتبطة بالمحاثة التبادلية.

$$L_T = L_1 + L_2 - 2M \qquad (7\text{-}13)$$

إن أحد التطبيقات المهمة على المحاثة التبادلية هي المحولة التي تتكون من ملفين بينهما محاثة تبادلية ويزود احدهما بتيار من مصدر لتجهيز القدرة حيث يفعل الاقتران بين الملفين بأن تتولد (تحتث) (ق. د. ك.) في الملف الثاني.

مثال 7-2

ملفان على قلب ما مقدار المحاثة الذاتية لهما (0.247 ، 0.968) هنري ، احسب المحاثة التبادلية بينهما والمحاثة المكافئة لهما عند ربطهما ربطاً تعاضدياً أو تعاكسياً على فرض أن 80% من التدفق يشترك بينهما.

الجواب

$$M = k\sqrt{L_1 \times L_2}$$

$$M = 0.8 \times \sqrt{0.247 \times 0.968} = 0.391\ H$$

عند ربط الملفين ربطاً متوالياً تعاضدياً تكون المحاثة المكافئة

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L_T = 0.247 + 0.968 + 2 \times 0.391 = 1.997\ H$$

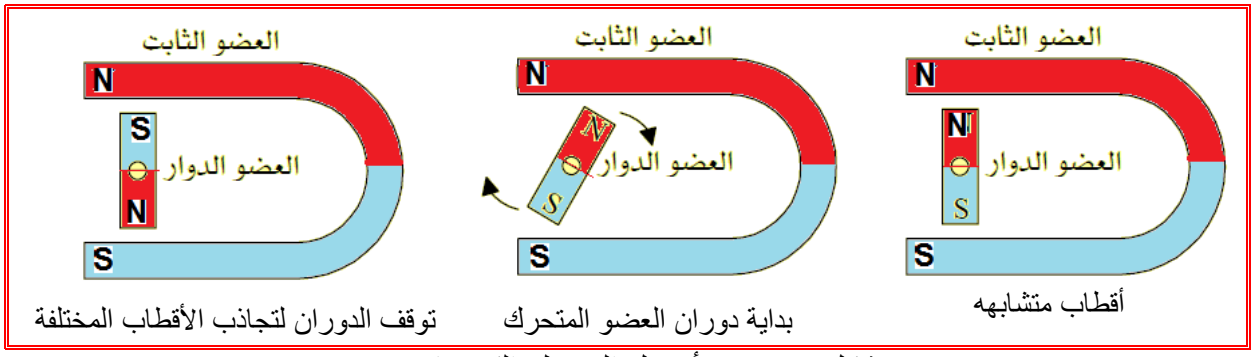
وعند ربطهما ربطاً متوالياً تعاكسياً تكون المحاثة المكافئة

$$L_T = L_1 + L_2 - 2M$$

$$L_T = 0.247 + 0.968 - 2 \times 0.391 = 0.433\ H$$

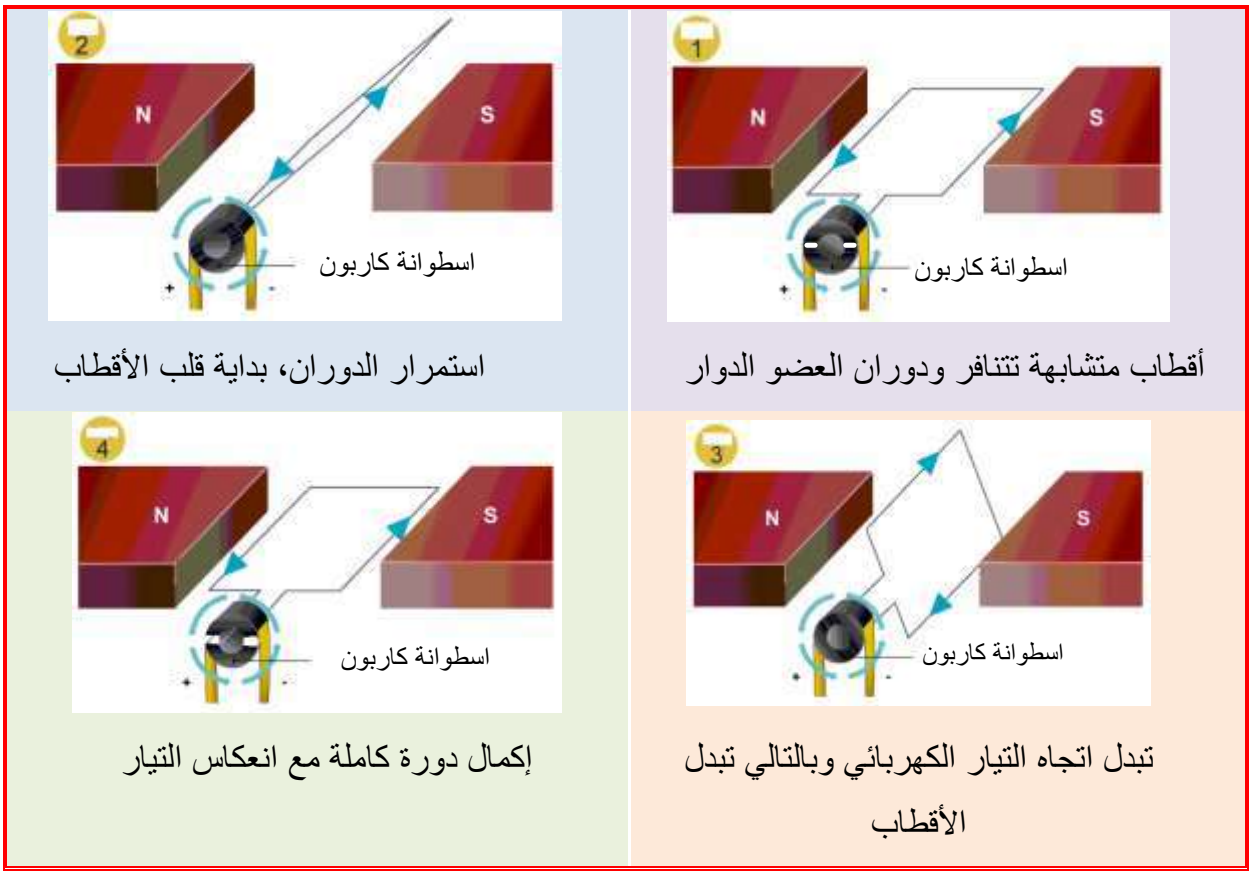
6-7 كيف تعمل المحركات الكهربائية How Electrical Motor Works

يعتمد مبدأ دوران المحرك الكهربائي على المبدأ العام للمغناطيسية الذي ينص على أن الأقطاب المتشابهة تتنافر والمختلفة تتجاذب. لنأخذ حالة مغناطيس يدور حول محور موضوع بين فكي مغناطيس (ولنطلق عليه العضو الدوار) وآخر ثابت (ولنطلق عليه العضو الثابت)، كما مبين في الشكل (7-14) وتبعاً لتنافر الأقطاب المتشابهة فإن العضو الدوار سوف يدور نصف دورة حتى تتجاذب الأقطاب المختلفة ويتوقف عن الحركة.



شكل 7-14 مبدأ عمل المحرك الكهربائي

إذاً لضمان استمرارية دوران العضو الدوار فيجب إبدال أقطاب العضو الدوار باستمرار بحيث يبدل قطبه كلما أختلف مع القطب المجاور له، ويمكن ذلك عن طريق إبدال المغناطيس ذي الأقطاب الثابتة بآخر ذي أقطاب مختلفة، ويتم ذلك عن طريق المغناطيسية الكهربائية، فلو أبدلنا العضو الدوار الحالي بملف كهربائي يمر به تيار مستمر، ويتم عكس أقطاب الملف المغناطيس عن طريق أسطوانة من الفحم يتم فيها قلب الأقطاب عند دوران العضو الدوار لاستطعنا أن نجعل العضو الدوار أن يدور باستمرار، وكما مبين في الشكل (7-15).

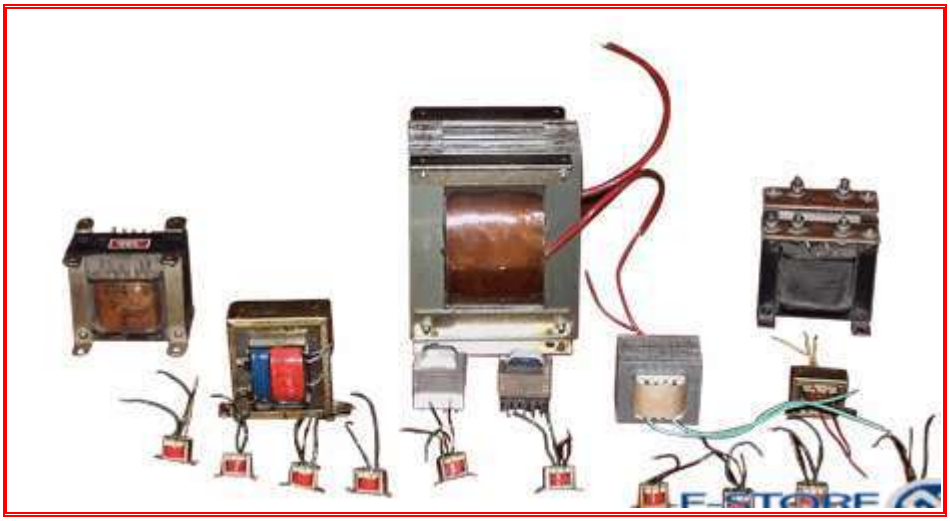


شكل 7-15 مبدأ عمل محرك التيار الكهربائي يعمل على التيار المستمر

أما بالنسبة للمحركات التي تعمل على التيار المتناوب فلا توجد حاجة إلى عكس الأقطاب الكهربائية، فعند استخدام تيار متناوب بقيمة مقدارها 50 Hz، فإن الأقطاب المغناطيسية للملف الدوار سوف تبدل اتجاهها 50 مرة في الثانية الواحدة، أي أن العضو الدوار سيدور بسرعة 50 دورة في الثانية الواحدة.

7-7 المحولات الكهربائية Electrical Transformers

المحولة هي وسيلة كهربائية للتحكم بفرق جهد التيار الكهربائي المتغير، وتستخدم محولات التأثير الكهرومغناطيسي المتبادل بين ملفين كهربائيين لرفع فرق جهد التيار الكهربائي أو خفضه، وكما تم ذكره سابقاً في هذا الفصل تعتمد طريقة عمل المحولات على مبدأ الحث المتبادل للمجال المغناطيسي. وتستخدم المحولات الكهربائية على نطاق واسع، ابتداءً من محولات محطات التوليد وشبكات نقل وتوزيع الكهرباء ذات السعات العالية (ذات قدرات تقاس بالميكاواط MW)، وانتهاءً بالمحولات ذات السعات الصغيرة المستخدمة في أجهزة الاتصالات (ذات قدرات تقاس بالميلي واط mW). والشكل (7-16) يبين نماذج للمحولات شائعة الاستخدام.

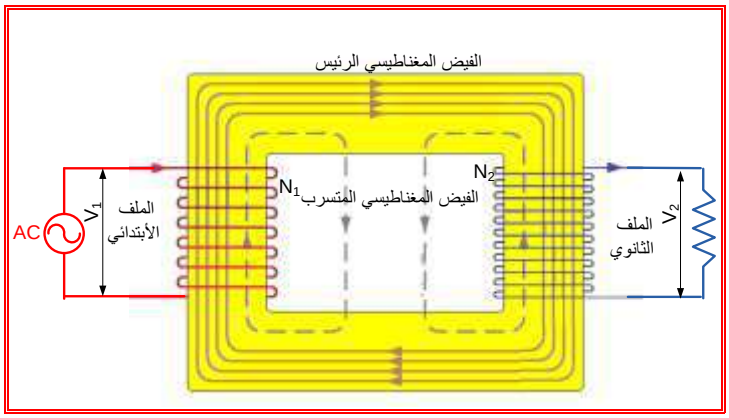


شكل 7-16 نماذج مختلفة لمحولات كهربائية ذات قدرات صغيرة نسبياً

إن أساس عمل المحولات الكهربائية Electric Transformers يعتمد على ظاهرة التأثير المتبادل (المحاثة التبادلية) التي تحدث عند تغير المجال المغناطيسي لملف، كما تم ذكره سابقاً في هذا الفصل، وتُعرف هذه الظاهرة على أنها عند تغير المجال المغناطيسي في ملف، سيتولد جهد بالتأثير في ملف آخر مجاور للملف الأول. ولتوضيح هذا التأثير لاحظ الشكل (7-17)، فإذا وصل الملف الابتدائي Primary Winding (L_1) بمصدر لتيار متناوب، سيتولد حوله مجال مغناطيسي متغير، يزداد وينقص حسب تغير شدة التيار المار بالملف. إن المجال المغناطيسي المتغير سيولد جهداً بالتأثير في الملف الثانوي Secondary Winding نتيجة اختراق المجال للملف، وإن الجهد المتولد بالملف الثانوي يمكن أن يستفاد منه لتشغيل حمل كهربائي.

يلاحظ إن الطاقة الكهربائية انتقلت من دائرة الملف الابتدائي إلى دائرة الملف الثانوي دون وجود موصلات كهربائية مباشرة، بل من خلال الاتصال المغناطيسي. وبصورة عامة تصنع المحولة الكهربائية من قلب من الحديد وملف ابتدائي وآخر ثانوي ملفوفين حول القلب الحديدي، وكما هو مبين في الشكل (7-17)، فعندما يمر تيار متناوب بفرق جهد مقداره V_1 في الملف الابتدائي الذي عدد لفاته N_1 فإن فرق جهد مقداره V_2 سيتولد في الملف الثانوي الذي عدد لفاته N_2 وحسب القانون الآتي:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \qquad (7\text{-}14)$$



شكل 7-17 المحولة الكهربائية

إن وحدة قياس التأثير المتبادل بين ملفين كما تم ذكره سابقاً هي نفسها وحدة قياس التأثير الحثي (الهنري). وبذلك يكون التأثير المتبادل بين الملفين الابتدائي والثانوي في الشكل (7-17) هنري واحد عندما يتولد جهد قدره واحد فولت بين طرفي الملف الثانوي نتيجة تغير قيمة التيار في الملف الابتدائي بمقدار أمبير واحد بالثانية.

ويمكن زيادة التأثير المتبادل بين الملفين من خلال:

1- تقليل المسافة الفاصلة بين الملفين.
2- الملفان يكونان بوضع بحيث محوراهما متوازيان.
3- زيادة عدد اللفات لكل من الملف الابتدائي والثانوي.
4- استخدام وسط فاصل بين الملفين ذي نفاذية مغناطيسية عالية .

وهنالك عامل آخر قد تم ذكره يشير إلى مدى تأثير لفات أي من الملفات (الابتدائي والثانوي) بالمجال المغناطيسي للملفين الآخرين يسمى هذا العامل بمعامل الربط (k) Coupling Coefficient، تكون قيمة هذا المعامل واحداً عندما تكون جميع خطوط المجال المغناطيسي لأحد الملفين تتقاطع مع كل لفات الملف الآخر. وبشكل عام تتراوح قيمة معامل الربط 0.98 أو 0.99 لبعض المحولات التي تستخدم قلب حديدي، وفي بعض المحولات الراديوية التي تستخدم قلباً هوائياً تتراوح قيمة معامل الربط إلى ما يقل عن 0.05 أو 0.1.

في المحولات المثالية (إهمال الفقدان بالطاقة خلال المحولة) تكون القدرة في الملف الثانوي مساوية لقدرة الملف الابتدائي، لكن هذا غير ممكن عملياً بسبب تحول جزء من الطاقة الكهربائية إلى طاقة حرارية، مما يؤدي إلى أن تكون القدرة المتولدة من الملف الثانوي دائماً أقل من تلك المجهزة للملف

الابتدائي، والنسبة بين القدرة الخارجة من المحولة إلى القدرة الداخلة للمحولة تسمى كفاءة المحولة ويرمز لها (η). وتمتاز المحولات بكفاءة عالية تتراوح ما بين 95% إلى 98%.

إن الفقدان للطاقة في المحولات يكون ناتج من عاملين أساسيين هما الفقد خلال القلب الحديدي (الفقد الحديدي)، والذي يمكن خفضه من خلال تشكيل القلب من رقائق حديدية معزولة عن بعضها، والفقد الناشئ في الملفات النحاسية (الفقد النحاسي) والذي يتناسب طردياً مع مربع شدة التيار.

مثال 7-3

محولة كهربائية تنخفض الفولتية فيها من 1200 V إلى 120 V تجهز حمل قريب منها بقدرة مقدارها 5 kW، فإذا كان عدد لفات الملف الابتدائي 4000 لفة وكفاءتها ($\eta = 0.95$) احسب الآتي:

1. عدد لفات الملف الثانوي.
2. القدرة الداخلة في الملف الابتدائي.
3. التيار المنساب في الملف الثانوي، إذا علمت أن معامل القدرة يساوي 0.8

الجواب:

1. $\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$

$\frac{120}{1200} = \frac{N_2}{4000} \quad \Rightarrow \quad N_2 = \frac{120 \times 4000}{1200} = 400$

2. $\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \quad \Rightarrow \quad P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{5000}{0.95} = 5263 \text{ W}$

3. $P = V \times I \times \cos \emptyset$

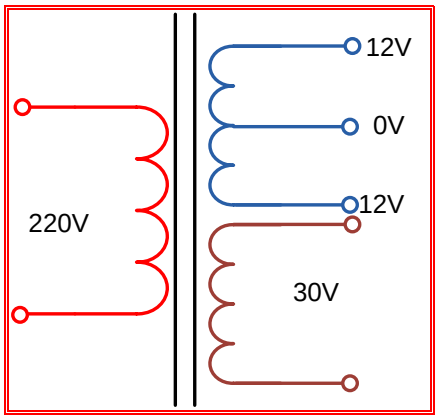
$5000 = 120 \times I \times 0.8$

$I = \frac{5000}{120 \times 0.8} = 52 \text{ A}$

1-7-7 أنواع المحولات الكهربائية Types of Electrical Transformers

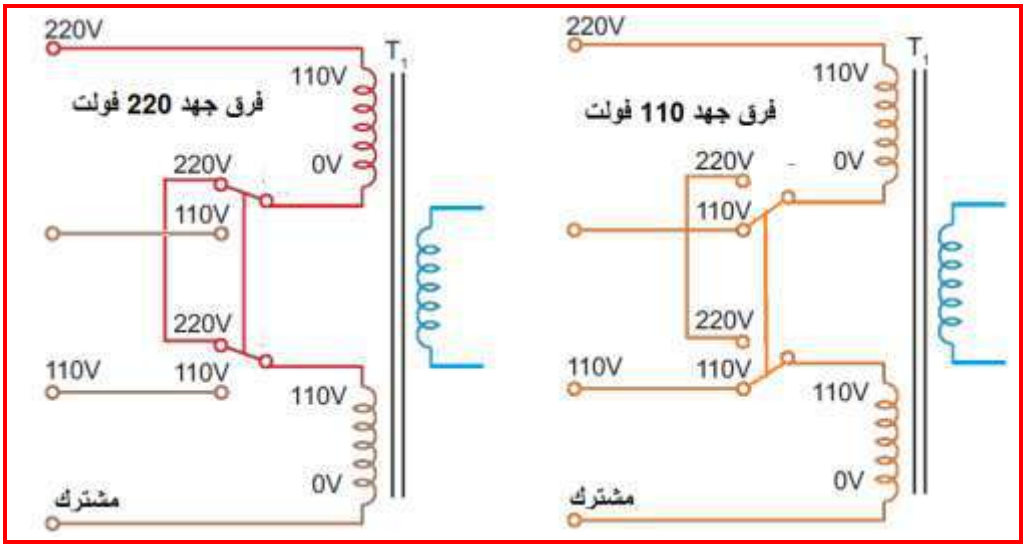
هنالك أنواع مختلفة من المحولات الكهربائية، وفي ما يلي بعض منها:

1. محول القدرة الذي يستخدم لخفض القدرة لوحدات التغذية للأجهزة الإلكترونية، حيث تتم عملية خفض الجهد المتناوب (220V-AC) إلى قيمة مناسبة حسب حاجة الجهاز الإلكتروني من خلال استخدام أكثر من ملف ثانوي للحصول على فروق جهد مختلفة، وكما هو مبين بالشكل (18-7).



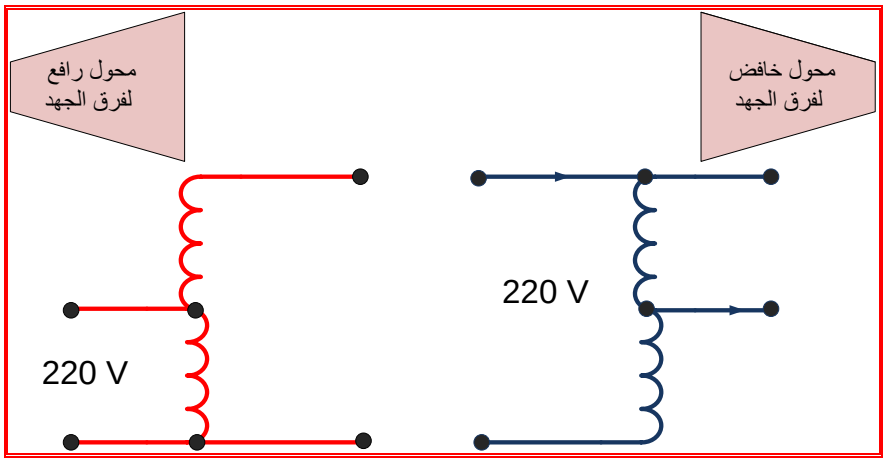
شكل 7-18 محول قدرة متعدد الملفات

2. محول القدرة متعدد الأغراض: تزود محولات القدرة متعددة الأغراض بملفين ابتدائيين يسمحان بالعمل على تغذية بفرقي جهد هما 110 فولت و 220 فولت، وكما مبين في الشكل (19-7)، حيث يبين الشكل عمل المحول على 110 أو 220 فولت، ويجب الحذر من استخدام المحول، حيث أنه إذا وصل المفتاح على 110 فولت ووضعت في مصدر فرق جهده 220 فولت فهذا يؤدي إلى احتراق ملفات المحول.



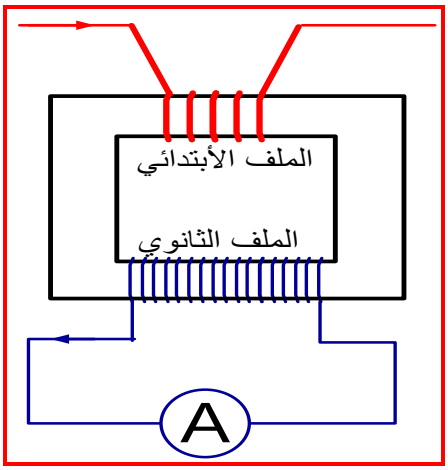
شكل 7-19 محول قدرة متعدد الأغراض

3. المحول الذاتي: ويتكون من ملف واحد مشترك بين الجانبين الابتدائي والثانوي، مما يقلل الأسلاك النحاسية المستخدمة للملفات وبالنتيجة تقليل حجم ووزن المحول. ويكون تركيب المحول كما مبين بالشكل (7-20). ويستخدم المحول الذاتي لرفع أو خفض الفولتية عندما تكون نسبة التحويل غير مرتفعة، وكذلك عندما يكون العزل بين الملفين الابتدائي والثانوي غير ضروري.



شكل 7-20 المحول الذاتي

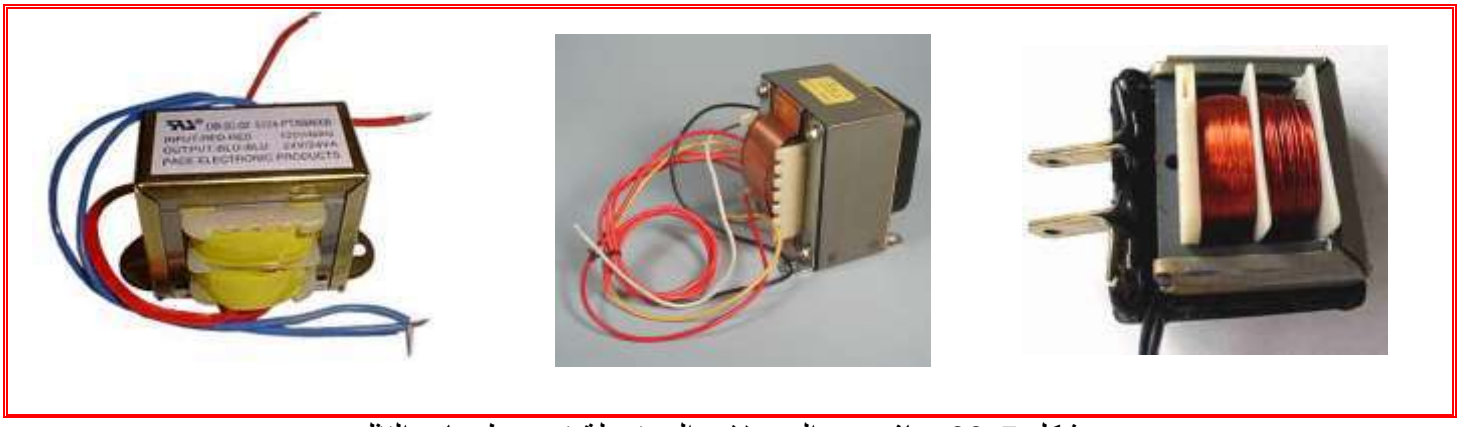
4. محول التيار: يكون تركيب هذا المحول، كما مبين بالشكل (7-21) من ملف ابتدائي ويستخدم سلك ذو مساحة مقطع كبيرة وعدد لفاته قليلة. أما الملف الثانوي فيكون على العكس من الملف الابتدائي حيث يكون بعدد لفات كثيرة ومساحة مقطع السلك صغيرة. يربط الملف الابتدائي على التوالي بخط الحمل المراد قياس تياره، أما الملف الثانوي فيربط بجهاز قياس التيار. يستخدم هذا النوع من المحولات مع أجهزة قياس التيار المتناوب، لخفض التيار لقيمة مناسبة يمكن قياسها، وكذلك يستخدم لعزل جهاز القياس عن أسلاك الفولتية العالية.



شكل 7-21 محول التيار

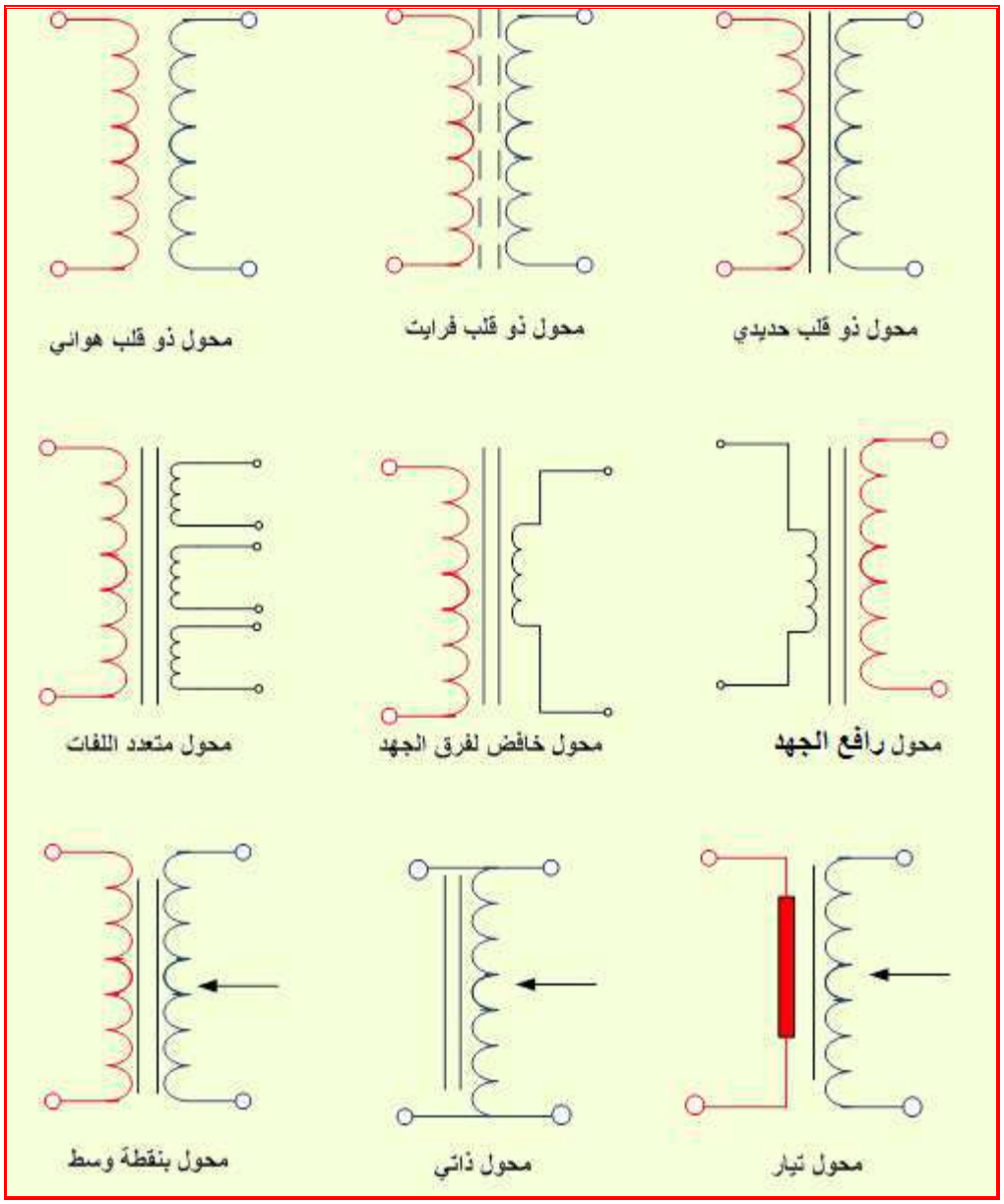
كما أُشير سابقاً هنالك الكثير من أنواع المحولات التي جاء توضيحها سابقاً هي محولات أحادية الطور، لأنها تعمل على تحويل جهد التيار المتناوب ذي الطور الواحد. لكن هنالك محولات ثلاثية الأطوار تستخدم للقدرات الكبيرة، إما المحولات المستخدمة لأغراض السيطرة والتحكم في منظومات التثليج وتكييف الهواء، فإنها تقوم بخفض جهد المصدر الكهربائي عادة إلى 24 V فيها، والشكل (7-22) يمثل بعض المحولات المستخدمة في أجهزة التثليج وتكييف الهواء. وبشكل عام للمحولات مواصفات فنية تميز بعضها عن البعض الآخر، فمنها مواصفات لها علاقة بشكل وتركيب المحولة، إما المواصفات التي تثبت من قبل الشركات المصنعة والمثبتة على المحولة، والتي يتم على غرارها اختيار المحولة، فهي:

1- جهد الملف الابتدائي، وهي (الفولتية) التي يمكن توصيلها للملف الابتدائي دون تضرره.
2- التيار الثانوي الأقصى، الذي يمكن أن يسحبه الحمل الكهربائي من المحولة دون إتلافه.
3- جهد الملف الثانوي، وهي مقدار (الفولتية أو الفولتيات) التي تنتج من المحولة عند تغذية الملف الابتدائي (بفولتية) مقررة.
4- الحمل بوحدات فولت- أمبير (قدرة المحول)، وهي القدرة التي تحدد أقصى قيمة للتيار يمكن أن تسحب من المحولة. وتعطى هذه القدرة بوحدات فولت- أمبير وليس بوحدة الواط.



شكل 7-22 نماذج من المحولات المستعملة في منظومات التثليج

كما يوضح الشكل (7-23) الرموز الفنية للمحولات شائعة الاستعمال.



شكل 7-23 الرموز الفنية للمحولات الكهربائية

7-8 التيار المتناوب والعناصر الكهربائية

Alternating Current and Electrical Components

جميع الدوائر الكهربائية تحتوي على أحمال مختلفة، قد يكون الحمل عبارة عن مقاومة خالصة أو حمل سعوي أو محاثة. في هذه الفقرة سيتم تحليل الدوائر الكهربائية التي تحتوي على العناصر المذكورة وسُلّط عليها فرق جهد جيبي (متناوب).

أولاً: الحمل عبارة عن مقاومة خالصة Pure Resistance

عند تسليط فولتية متناوبة على حمل عبارة عن مقاومة خالصة، فإن التيار الذي يمر فيها يرتبط مع الفولتية وفق قانون أوم، أي أن موجة الفولتية وموجة التيار لهما الشكل نفسه. ويحسب مقدار التيار كالآتي:

$$\mathbf{I_R = \frac{V}{R}} \qquad (7\text{-}15)$$

حيث أن I_R هو التيار المار بالمقاومة.

ثانياً: الحمل عبارة عن متسعة Capacitance

عند تسليط فولتية متناوبة على حمل عبارة عن متسعة، فإن التيار الذي يمر فيها لا يرتبط مع الفولتية، بل يتقدم بمقدار 90 درجة. ويحسب التيار المار بالمتسعة حسب المعادلة الآتية:

$$\mathbf{I_C = \frac{V}{1/2\pi \times f \times C}} \qquad (7\text{-}16)$$

إذ أن:

I_C	التيار المار بالمتسعة	أمبير	A
f	التردد	هيرتز	Hz
C	السعة	فاراد	F

ثالثاً: الحمل عبارة عن محاثة Inductance

عند تسليط فولتية متناوبة على حمل عبارة عن محاثة، فإن التيار الذي يمر فيها لا يرتبط مع الفولتية، بل يتأخر بمقدار 90 درجة. ويحسب التيار المار بالمحاثة حسب المعادلة الآتية:

$$\mathbf{I_L = \frac{V}{2\pi \times f \times L}} \qquad (7\text{-}17)$$

إذ أن:

I_L	التيار المار بالمحاثة	أمبير	A
f	التردد	هيرتز	Hz
L	المحاثة	هنري	H

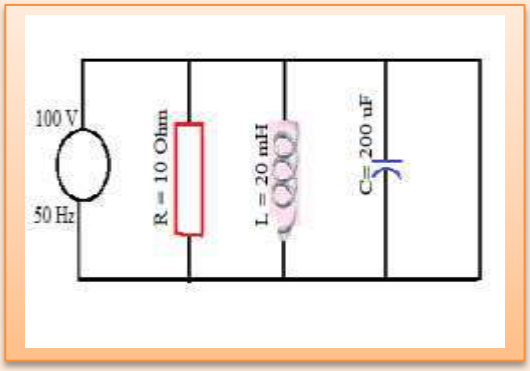
مثال 7-4

دائرة تيار متناوب تحتوي على مقاومة مقدارها 10 Ω ومحث محاثته 20 mH ومتسعة سعتها 200 μF ربطت جميعها على التوازي وسلطت عليها فولتية متناوبة مقدارها 100 V تردد 50 Hz

احسب ما يأتي:

1. التيار الكلي المجهز من المصدر.
2. زاوية فرق الطور بين الفولتية والتيار الكلي.
3. عامل القدرة.

الجواب



$$I_R = \frac{V}{R} = \frac{100}{10} = 10\ A$$

ويصنع زاوية مقدارها صفراً مع فولتية المصدر.

$$I_L = \frac{V}{2\pi \times f \times L} = \frac{100}{2\pi \times 50 \times 20 \times 10^{-3}} = 16\ A$$

ويصنع زاوية مقدارها 90 درجة متأخراً عن الفولتية.

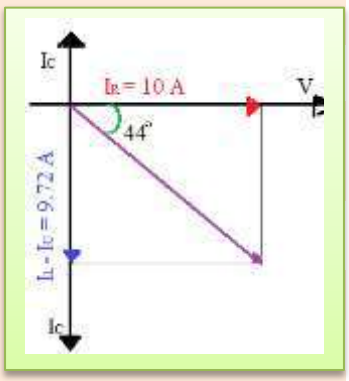
$$I_C = \frac{V}{1/2\pi \times f \times C} = \frac{100}{1/2\pi \times 50 \times 200 \times 10^{-6}} = 6.28\ A$$

ويصنع زاوية مقدارها 90 درجة متقدماً على الفولتية.

وحيث أن تيار المتسعة بعكس اتجاه تيار المحث، لذا فإن محصلتهما هي الفرق بينهما وباتجاه التيار الأكبر منهما.

$$I_L - I_C = 16 - 6.28 = 9.72\ A$$

ومحصلة هذا التيار مع تيار المقاومة (المتعامدين) تساوي التيار الكلي الذي قيمته القصوى:



$$I = \sqrt{10^2 + 9.72^2} = 14\ A$$

ويصنع زاوية مقدارها:

$$\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{9.72}{10}\right) = 44^\circ$$

معامل القدرة:

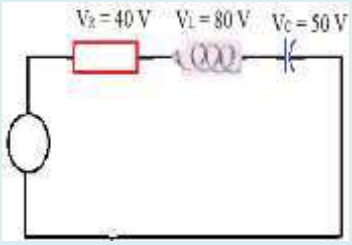
$$\cos \emptyset = \cos 44^\circ = 0.72$$

مثال 7-5

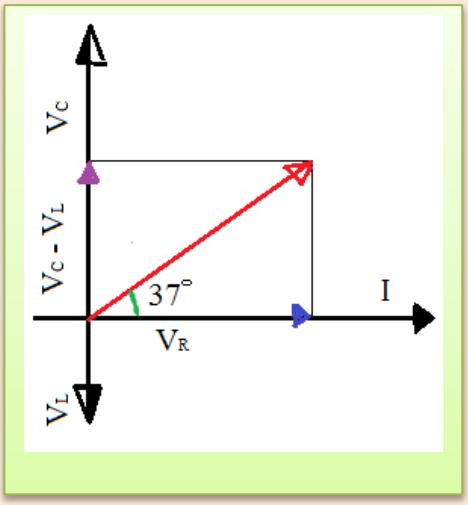
دائرة تيار متناوب تحتوي على مقاومة ومحاثة ومتسعة، ربطت جميعها على التوالي، إذا كان هبوط الجهد عبر المقاومة 40 V وهبوط الجهد عبر المحاثة 80 V وعبر المتسعة 50 V، وكان التيار الكلي المار بالدائرة يساوي 2 A، احسب ما يأتي:

1. فرق الجهد الكلي.
2. زاوية فرق الطور بين الفولتية والتيار الكلي.
3. عامل القدرة.
4. القدرة الحقيقية

الجواب



من مخطط المتجهات الطورية تكون محصلة فرق الجهد الكلي:



$$V_T^2 = V_R^2 + (V_L - V_C)^2$$

$$V_T^2 = 40^2 + (80 - 50)^2 =$$

$$V_T^2 = 1600 + 900 = 2500$$

$$V_T = \sqrt{2500} = 50 \text{ V}$$

$$\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{80-50}{40}\right) = 37^\circ$$

Power Factor = cos ∅ = cos 37 = 0.8

$$P = V \times I \times \cos \emptyset$$

$$P = 50 \times 2 \times 0.8 = 80 \text{ W}$$

أسئلة الفصل السابع

س1: عرّف ما يأتي:

التيار الكهربائي ، المغناطيسية ، الفيض المغناطيسي ، المغناطيسية الكهربائية ، المجال المغناطيسي ، الحث المتبادل ، التأثير المتبادل ، المحول الكهربائي ، معامل الربط.

س2: أذكر أهم الخواص الفنية لمحول كهربائي مطلوب استخدامه في دائرة سيطرة منظومة تثليج.

س3: علل ما يأتي:

أ- تولد التيار المتناوب.

ب- انتقال الطاقة الكهربائية من دائرة الملف الابتدائي إلى دائرة الملف الثانوي في المحولات الكهربائية.

ت- استخدام التيار المتناوب.

ث- استخدام المحولات الكهربائية.

ج- استخدام القلب الحديدي في المحولات الكهربائية.

س4: عدد لما يأتي:

أ- استخدامات التيار المتناوب والتيار المستمر.
ب- خواص الخطوط المغناطيسية.
ت- الصفات الفنية للمحولات الكهربائية.
ث- طرق زيادة التأثير المتبادل بين ملفي المحول الكهربائي.
ج- أجزاء المحول الكهربائي.

س5: وضّح مع الرسم العلاقة بين الأطوار لتيار متناوب ثلاثي الطور.

س6: ما أنواع التوصيلات للتيار ثلاثي الطور؟ وضّحها ثم قارن بينها.

س7: اشرح عملية تولد المجال المغناطيسي في ملف كهربائي.

س8: اعتماداً على الظاهرة الكهرومغناطيسية، ناقش مبدأ حركة المحركات الكهربائية.

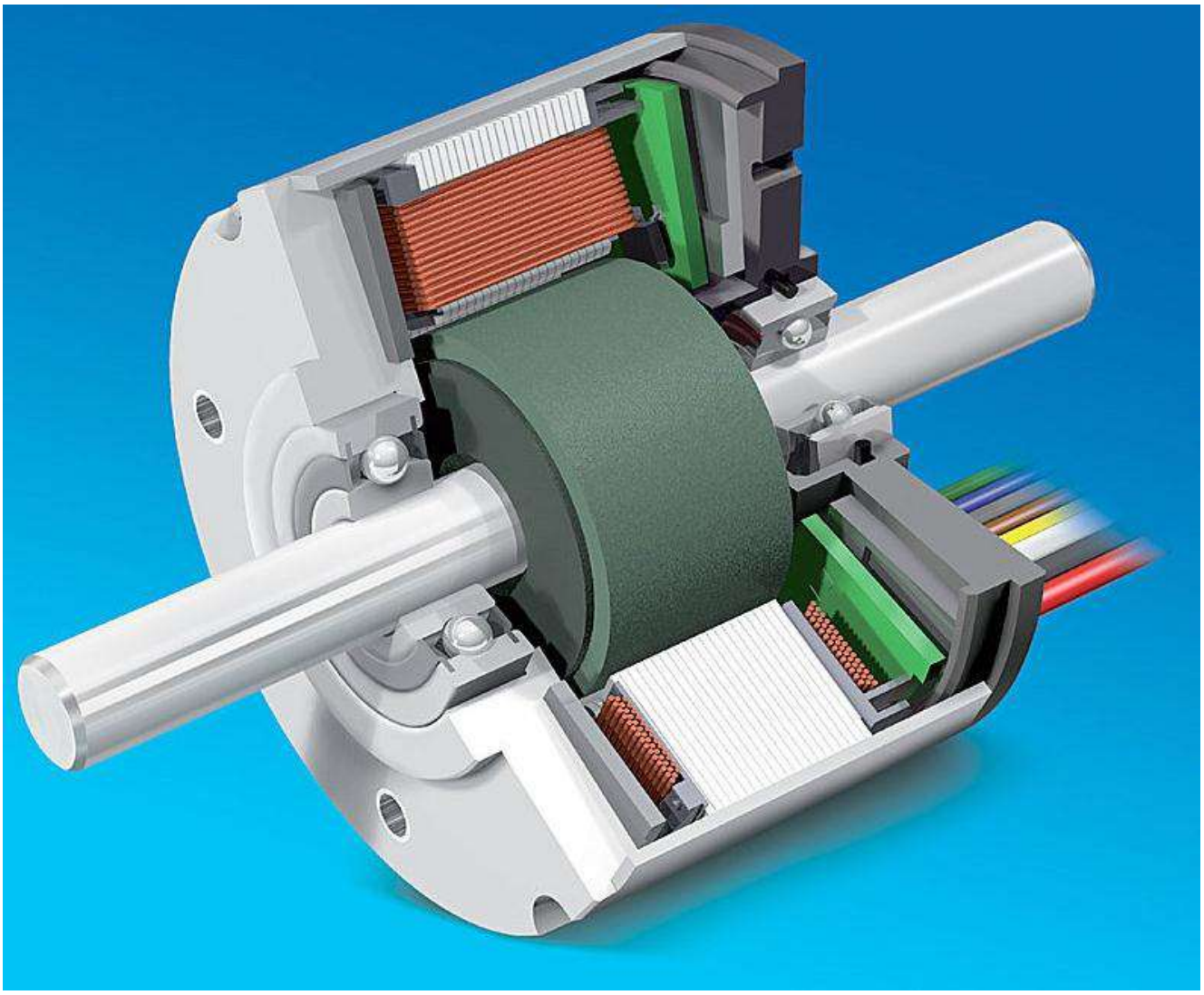
س9: محولة كهربائية تخفض الفولتية من 2200 V إلى 220 V يوصل الحمل مباشرة بملفها الثانوي إذا كان عدد لفات الملف الابتدائي 2000 لفة وكان التيار المنساب فيه 5A والقدرة الضائعة داخل المحولة 440 W، احسب 1- عدد ملفات الملف الثانوي، 2- كفاءة المحولة.

$ج_1$=200 لفة $ج_2$=96%

الفصل الثامن

المحركات الكهربائية

Electrical Motors



المحركات الكهربائية

Electrical Motors

1-8 مقدمة Introduction

إن المواد المغناطيسية تشكل جزءاً مهماً في تركيب الآلات الكهربائية كالمحركات والمولدات، فهي تشكل وتوجه المجالات المغناطيسية التي تمثل الوسط الذي تتم فيه عملية تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية في المحركات الكهربائية وبالعكس في المولدات حيث يتم تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية.

في المحولات وكما تم التطرق إليه سابقاً تكون الدائرة المغناطيسية مغلقة، إما الآلات الكهربائية الدوارة، فإنها تحتوي على عنصرين أساسيين هما العضو الثابت (Stator) والعضو الدائر (Rotor) حيث يكونان منفصلين بواسطة فجوة هوائية. وفي معظم الآلات الكهربائية يتم توليد المجال المغناطيسي من خلال تمرير تيار كهربائي في سلك معزول ملفوف حول مادة حديدية مغناطيسية.

إن عمل المحركات الكهربائية كما تم ذكره في الفصل السابع يتم من خلال تمرير تيار كهربائي خلال الموصلات الموضوعة داخل مجال مغناطيسي، وينتج عن ذلك توليد قوة ميكانيكية في كل موصل، وإذا كانت الموصلات محمولة على محور معدني قابل للدوران بحرية، يتولد عزم كهرومغناطيسي يحاول دفع المحور للدوران بسرعة معينة، كما يتولد جهد في الموصلات المتحركة يعاكس جهد المصدر للتقليل من التيار الذي يسحبه المحرك من المصدر، كما إن المحركات الكهربائية تصنف طبقاً لمصدر التغذية، إلى محركات أحادية الطور (المحركات التي يتم تغذيتها بتيار متناوب أحادي الطور)، ومحركات ثلاثية الطور (التي تستخدم تيار متناوب ثلاثي الطور). وتمتاز المحركات ثلاثية الطور بذاتية بدء الحركة وعزم ابتدائي كبير، إما المحركات أحادية الطور فإنها تحتاج إلى وسيلة بدء الحركة. تستخدم محركات أحادية الطور في التطبيقات الصغيرة، بينما تستخدم المحركات ثلاثية الطور للتطبيقات الكبيرة.

تستخدم في منظومات التثليج وتكييف الهواء أنواع مختلفة من المحركات الكهربائية، ذات التيار المتناوب، وهي إما أن تكون أحادية الطور أو ثلاثية الطور حسب القدرة الحصانية المطلوبة لإدارة الضواغط والمضخات والمراوح أو أجهزة التحكم من صمامات أو صفائح تنظيم الهواء.

إن الحاجة للمحركات الكهربائية تعتمد على مواصفاتها الفنية وحاجة أجزاء منظومات التثليج وتكييف الهواء. فالضواغط تحتاج إلى محركات ذات عزم ابتدائي كبير وكفاءة تشغيل عالية، بينما المراوح الصغيرة يمكن إدارتها بمحركات ذات عزم ابتدائي قليل وكفاءة تشغيلية متوسطة.

في هذا الفصل سيتم التطرق للمحركات الكهربائية المستخدمة في مجال التثليج وتكييف الهواء والمرحلات المستخدمة معها.

2-8 المحركات الكهربائية ثلاثية الأطوار Three Phase Electric Motors

إن فكرة عمل المحركات ثلاثية الطور تعتمد على المجال الدوار (Rotating Field)، وهو المجال المغناطيسي المتولد في العضو الثابت نتيجة مرور التيار المتناوب في ملفاته بطريقة تجعل أقطاب هذه الملفات متغيرة. إذ أن عمل المحركات التي تستخدم تياراً متناوباً يعتمد على التفاعل بين المجالين المغناطيسيين المتعاكسين والمتولدين في كل من العضو الثابت والعضو الدوار، وينتج عن ذلك دوران العضو الدوار.

فالمجال الدوار الناتج من مرور التيار الكهربائي في العضو الثابت، يعاكسه مجال متولد بالحث المغناطيسي في ملف العضو الدوار (كما هو الحال في المحركات الحثية Induction Motors) أو نتيجة لمرور تيار مستقر في ملفات العضو الدوار يغذى من مصدر خارجي (كما في المحركات التزامنيةSynchronous Motors).

ومن الجدير بالذكر، هو تشابه تصاميم العضو الثابت في محركات التيار المتناوب ثلاثية الأطوار، وإن الفرق بين الأنواع المختلفة يكون في طريقة توليد المجال المغناطيسي في العضو الدوار وتفاعل هذا المجال مع المجال الدوار في العضو الثابت.

1-2-8 أنواع المحركات الكهربائية ثلاثية الطور

المحركات الكهربائية ثلاثية الطور تنتج بنوعين أساسيين هما:

1- المحركات الحثية Induction Motors
2- المحركات التزامنية Synchronous Motors

1-1-2-8 المحركات الحثية Induction Motors

إن المحرك الحثي هو المحرك الكهربائي الذي يتولد فيه المجال المغناطيسي للعضو الدوار من إمرار التيار الكهربائي بالعضو الثابت.

كما تم ذكره سابقاً، يؤدي مرور التيار الكهربائي المتناوب في ملفات العضو الثابت إلى تولد مجال مغناطيسي دوار، (يكون المجال المغناطيس دوار بسبب تبدل أتجاه التيار المتناوب وكما تم ذكره)، ويقطع هذا المجال المغناطيسي الملفات الكهربائية للعضو الدوار والذي لا يوصل بأي مصدر ومغلق على نفسه، ونتيجة لهذا التقاطع يتولد تيار حثي يقوم بإنتاج مجال مغناطيسي آخر خاص به، وكما هو مبين في الشكل (8-1)، ويكون هذا المجال المغناطيسي ذا أقطاب معاكسة لأقطاب المجال المغناطيسي المتكون في العضو الثابت. وبما أن المجال المغناطيسي للعضو الثابت يدور باستمرار فإن المجال المغناطيسي للعضو الدوار سيتبعه باستمرار مما يولد حركة دورانية للعضو الدوار، وبالتأكيد فإن سرعة العضو الدوار سوف تكون أقل من سرعة دوران المجال المغناطيسي للعضو الثابت. لذا ستكون هنالك حركة نسبية بين العضو الدوار والعضو الثابت مما يولد عزم المحرك الكهربائي الذي يقوم بإدارة المحرك لأول مرة، سرعة هذه المحركات لا تتغير مع زيادة الحمل إلا قليلاً وتكون بحدود 5% من سرعتها الطبيعية، مما يجعلها واسعة الاستخدام في التطبيقات المختلفة.

من الناحية العملية، لا يمكن للعضو الدوار أن يدور بنفس سرعة مجال العضو الثابت، حيث لابد من أن تكون هنالك حركة نسبية بين الاثنين وذلك لكي تتولد قوة تسبب دوران العضو الدوار، وطبقاً لهذه الحركة النسبية يتحدد عزم المحرك والتيار المستهلك لإدارته.

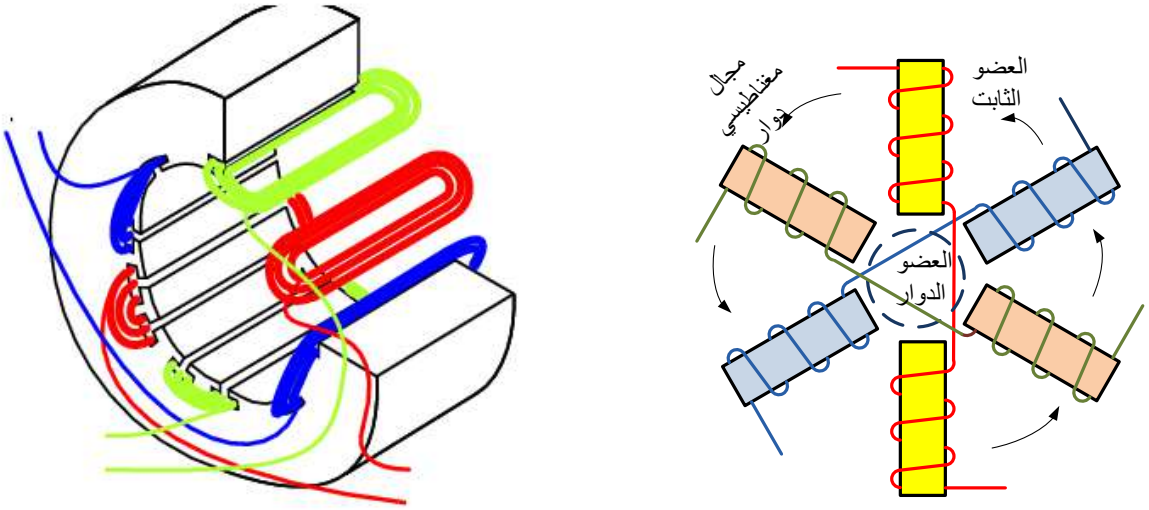
وتتشابه الأعضاء الثابتة للمحركات الكهربائية في حين أن الأعضاء المتحركة يمكن أن تكون على نوعين متقاربين في التكوين من ناحية الخواص الكهربائية، ومختلفين من ناحية الشكل ويسمى النوع الأول باسم العضو الدوار ذي الملفات، وهما:

أ- المحركات الحثية ذات العضو الدوار ذي الملفات The Wound Rotor Induction Motors

ب- المحركات الحثية ذات القفص السنجابي The Squirrel Cage Induction Motors

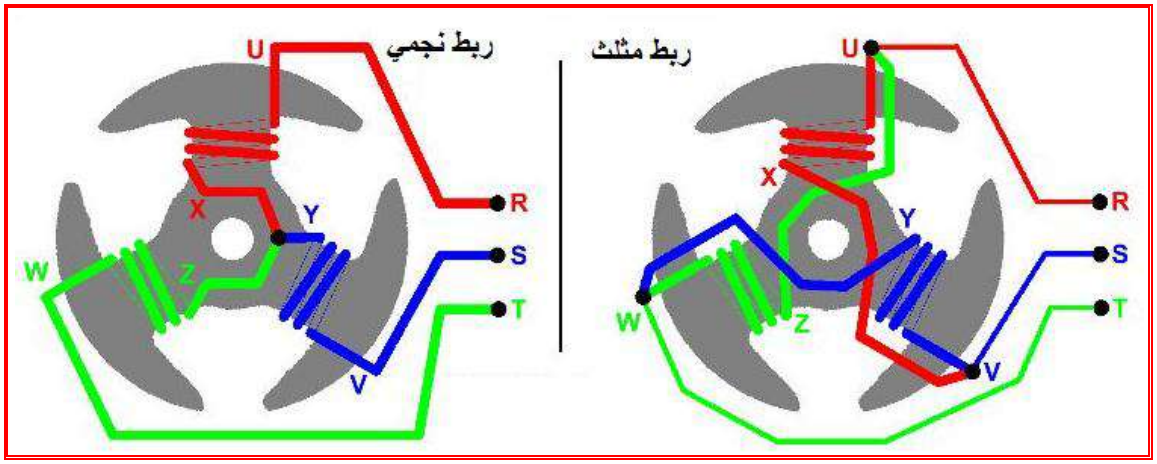
أولاً: المحركات الحثية ذات العضو الدوار ذو الملفات The Wound Rotor Induction Motors

يستخدم هذا النوع من المحركات في تشغيل وحدات التكييف الكبيرة. ويتكون العضو الدوار فيه من جسم اسطواني من رقائق الحديد المعزولة مع وجود قنوات على سطح بعضها تحتوي على ثلاثة ملفات ثلاثية الطور تشابه ملفات العضو الثابت، وكما هو مبين في الشكل (8-2)، تربط هذه الملفات الثلاث مع بعضها على شكل دلتا Δ أو نجمة **Y** حسب ظروف التشغيل، وكما هو مبين في الشكل (8-3)، وفي كلا الربطين توصل أطراف الملفات لثلاث حلقات انزلاق مركبة على عمود الدوران، ثم توصل إلى دائرة خارجية بواسطة فرشاة كربونية مركبة على حلقات الانزلاق، وهذا يسهل عملية ربط الملفات بالدائرة الخارجية التي تحتوي على مقاومة تساعد في بدء الحركة وكذلك تنظيم سرعة المحرك.



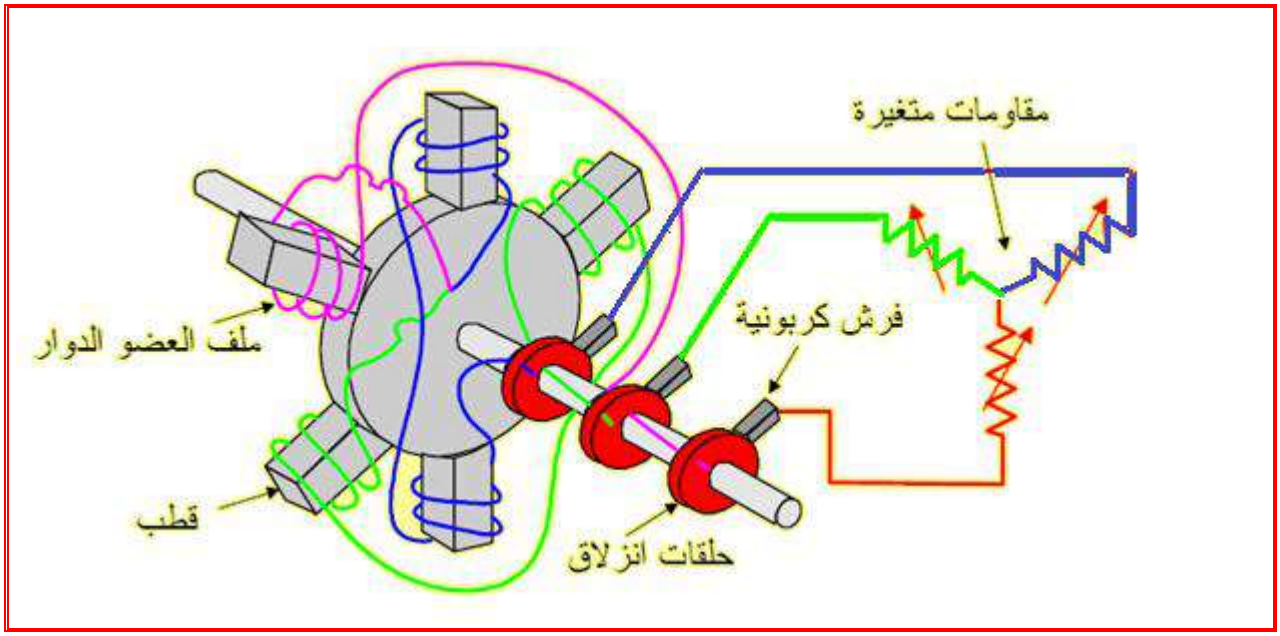
شكل 8-1 مبدأ عمل المحرك الحثي

شكل 8-2 العضو الدوار ذو الملفات



شكل 8-3 ربط العضو الدوار ذو الملفات

ويبين الشكل (8-4) عضواً دواراً له قطبان لكل طور، حيث توصل نهايات كل ملف مع بعضها البعض لتكون توصيلة **Y** بينما توصل بدايات الملفات بثلاث حلقات انزلاق منفصلة ومثبتة على عمود العضو الدوار حيث تسمح هذه الحلقات بتوصيل ثلاث مقاومات متغيرة مع هذه الملفات عن طريق الفرش الكربونية. إن وظيفة هذه المقاومات هي تقليل التيار المار في ملفات العضو الدوار عند بداية تشغيل المحرك فقط، لأنها ترفع من الدائرة بشكل تلقائي عند وصول المحرك إلى حالة التشغيل المطلوبة، كما إن هذه المقاومات تزيد من العزم الابتدائي لتشغيل المحرك.



شكل 8-4 عضو دوار ذو ملفات مع مقاومات بدء التشغيل

تستعمل معظم المحركات الكبيرة العضو الدوار ذا الملفات، ويمكن أن تغير قيمة المقاومة طريقة الحركة المتدرجة بدلاً من استخدام المقاومات المتغيرة. يبدأ المحرك حركته بسرعة منخفضة، وذلك لارتباط مجموعة من المقاومات مع ملفات العضو الدوار، لكن كلما زادت سرعة المحرك يتحرك موصل منزلق بحيث يتحرك بفعل قوة الطرد المركزي مما يؤدي إلى تقليل قيمة المقاومة مع ازدياد سرعة المحرك فإذا ما وصل إلى أقصى سرعة يكون موضع المنزلق في بداية المقاومة المتغيرة عندها تكون قيمة المقاومة الكهربائية تساوي صفراً.

وهنالك طرائق عدة لتتحكم في طريقة قصر المقاومات في المحركات الحثية ذات الملفات منها يعتمد التحسس بقيمة التيار المار في العضو الثابت (التحكم بحد التيار)، ومنها يعتمد على قياس سرعة المحرك (التحكم عن طريق تردد الانزلاق). إما الطريقة شائعة الاستخدام فإنها تتم من خلال مؤقتات زمنية لقصر المقاومات على فترات زمنية محددة، ومن الشكل (8-5) يلاحظ أن دائرة القدرة للمحرك

في أعلى الشكل إما دائرة التحكم فممثله بأسفل الشكل، كما يلاحظ استخدام المحوَل لتخفيض جهد دائرة السيطرة. ودائرة السيطرة تعمل وفق الخطوات الآتية:

1- عند ضغط مفتاح التشغيل يمر التيار خلال ملف بدء التشغيل للمحرك M ثم نقاط توصيل الحمل العالي (OL) ومن ثم يتمغنط الملف R_1 . حيث يعمل الملف M على ضمان توصيل دائرة التحكم بعد عمل مفتاح التشغيل. وبتوصيل الملف M تتصل أطوار التيار الثلاثة إلى المحرك فيبدأ الدوران بأقل سرعة لأن كل المقاومات متصلة بدائرة العضو الدوار.

2- R_1 عبارة عن مؤقت زمني يوصل التيار بعد وقت محدد من تشغيله، وعلى افتراض إن المؤقتات ضبطت لتعمل بعد خمس ثواني من تشغيلها، فإن الملف المغناطيسي S_1 سوف يتمغنط وتتصل نقاطه بعد خمس ثواني ومن ثم المؤقت R_2.

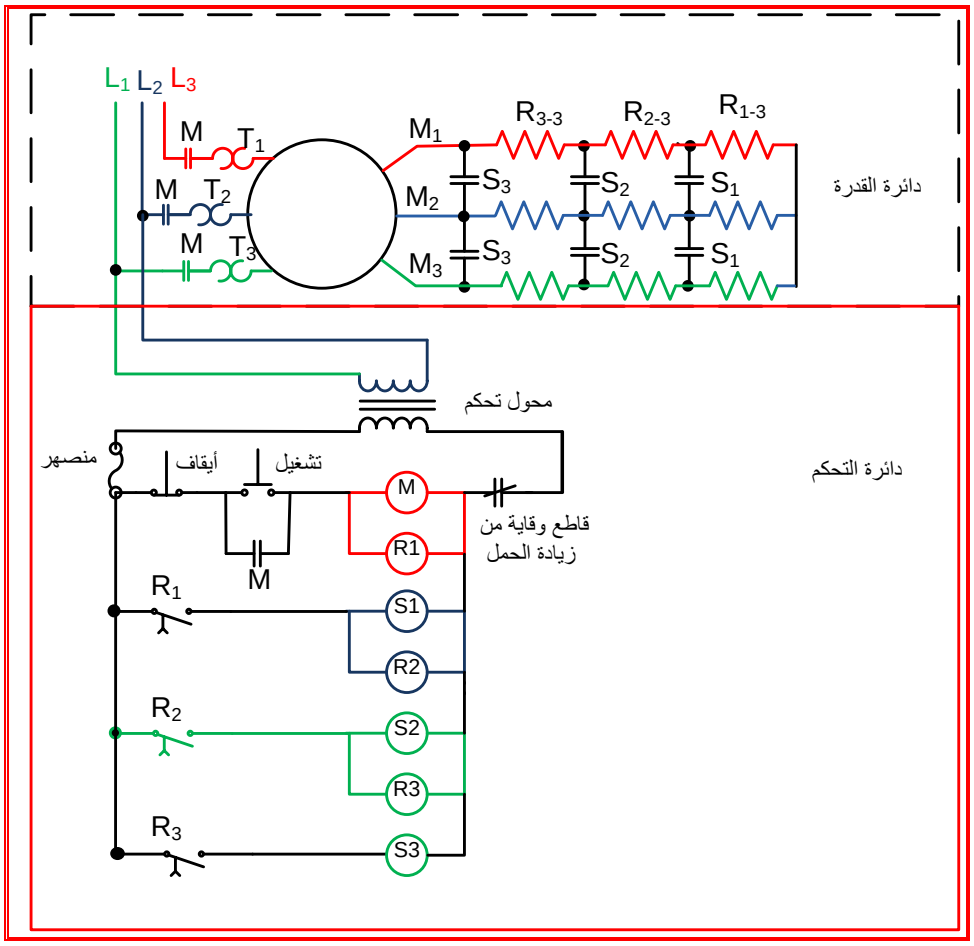
3- باتصال نقاط الملف S_1 تقصر المقاومات الثلاث R_{1-3} عن دائرة العضو الدوار مما يعجل المحرك إلى السرعة التالية نتيجة مرور تيار أكبر في ملفاته.

4- بعد خمس ثواني أخرى يبدأ المؤقت R_2 بإغلاق دائرة الملف S_2 ومن ثم المؤقت R_3.

5- بمغنطة الملف S_2 تقصر المقاومات R_{2-3} وتزداد سرعة المحرك أكثر من السابق لزيادة التيار المار خلاله مرة أخرى.

6- بعد خمس ثواني أخرى يبدأ المؤقت R_3 بالغلق مسبباً اتصال نقاط الملف المغناطيسي S_3 فتحذف المقاومات R_{3-3} من دائرة العضو الدوار، لتصل سرعة المحرك لقمتها القصوى بسبب رفع كل المقاومات المتصلة بها.

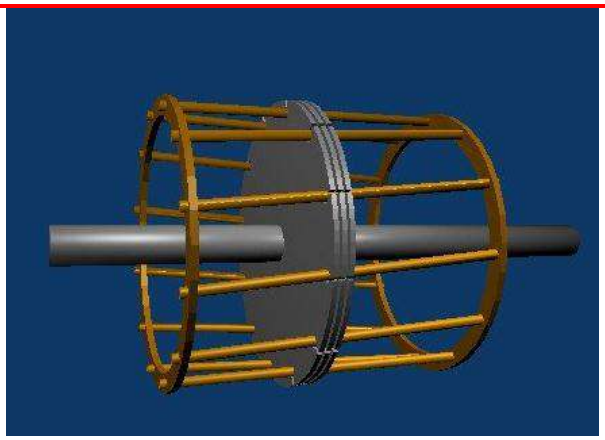
7- فإذا أريد إيقاف المحرك، يتم الضغط على مفتاح الإيقاف ليفقد الملف M مغنطته مسبباً قطع التيار من المحرك بشكل كامل وكذلك عن كل المؤقتات ويتوقف المحرك، وكذلك يحدث التوقف إذا انصهر المنصهر بسببٍ ما.



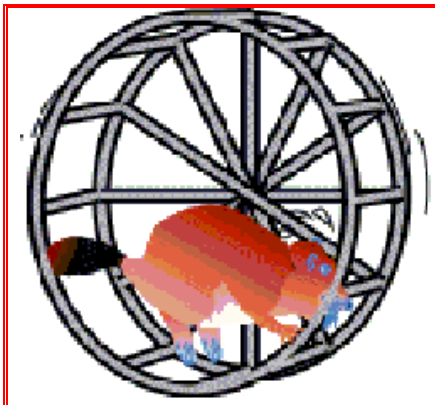
شكل 8-5 دائرة تحكم بدء تشغيل محرك حثي ذي ملفات

ثانياً: المحركات الحثية ذات القفص السنجابي The Squirrel Cage Induction Motors

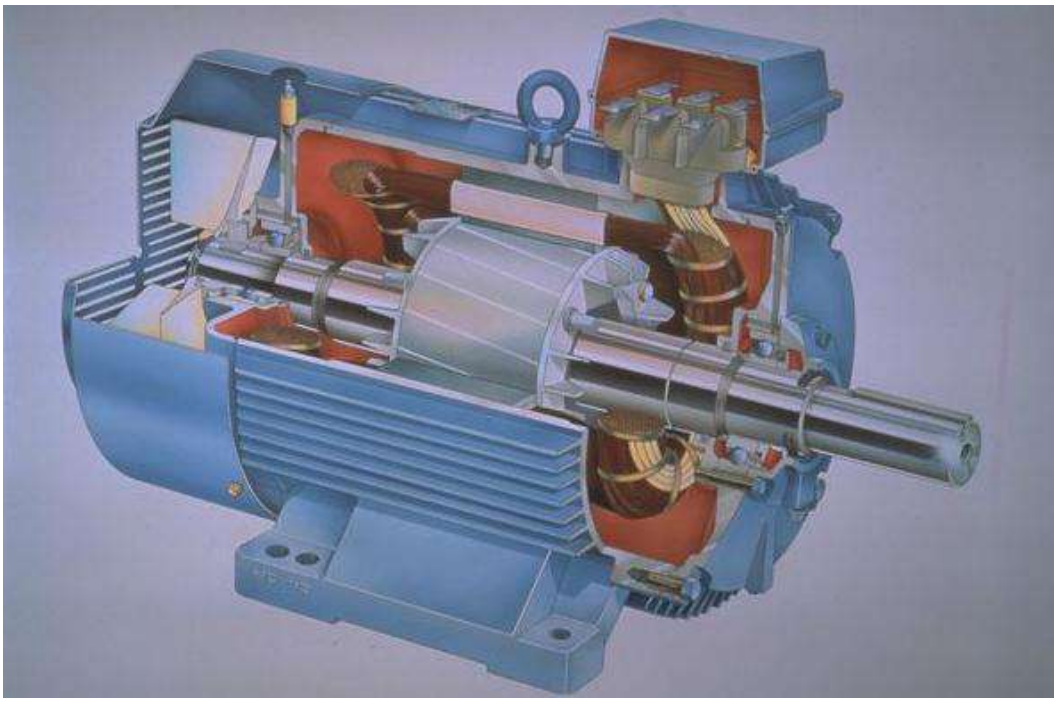
يكون تركيب العضو الدوار في هذا النوع من المحركات، مكوناً من جسم اسطواني مصنوع من رقائق الحديد وفيه قنوات يوضع فيها قضبان من النحاس أو الألمنيوم بدلاً عن الملفات، وهو مشابه للقفص الذي يحجز به السنجاب. (كما في المحركات الحثية ذات العضو الدوار ذي الملفات)، وتتصل القضبان من الطرفين بحلقات من نفس معدن القضبان. إن تركيبة القضبان تشبه في شكلها العام القفص السنجابي (لذلك سُميت هذه المحركات على أساس تركيبة العضو الدوار بالمحركات ذات القفص السنجابي)، ويبين الشكل (8-6) قضبان القفص السنجابي وكذلك العضو الدوار والعضو الثابت لهذا النوع من المحركات.



العضو الدوار (قفص السنجاب)



شكل قفص السنجاب



العضو الدوار والعضو الثابت في محرك قفص السنجاب

شكل 8-6 محرك قفص السنجاب

إن الموصلية الكهربائية للمادة التي تصنع منها قضبان القفص السنجابي، تتحكم بخصائص هذا النوع من المحركات، فالمواد ذات المقاومة الكهربائية العالية تعطي المحرك عزماً ابتدائياً عالياً وتيار ابتدائي قليل، وتتطلب نسبة انزلاق عالية كي يتغلب على الحمل المطلوب في أثناء التشغيل، ولهذا تعتبر خصائصه التشغيلية متدنية. إما المواد ذات المقاومة المنخفضة، يكون لها عزم تشغيل منخفض مع تيار ابتدائي للتشغيل عالٍ ويصاحب ذلك نسبة انزلاق قليلة. إن هذه المواد أعطيت رموزاً للاستدلال عليها وربطت هذه الرموز بتيار بداية التشغيل من خلال الكيلو فولت – أمبير المقاس عند توقف العضو الدوار، والجدول (8-1) يبين ذلك.

ومن طرائق بدء التشغيل المعتمدة في المحركات الحثية ذات القفص السنجابي، طريقة بدء التشغيل بمفتاح ستار– دلتا Y- Δ Motor Starting، حيث يكون التشغيل من خلال ربط ملفات العضو الثابت أولاً بطريقة **Y** ويستمر ذلك لحين وصول سرعة المحرك بحدود 75% من سرعة الحمل الكامل وعندها يتم عكس مفتاح التشغيل ليصل الملفات حسب طريقة Δ، وتمتاز هذه الطريقة بخفض تيار بدء التشغيل المجهز للمحرك إلى حدود ثلث تيار الحمل الكامل، ولكن يصاحبه انخفاض بعزم بدء التشغيل للمحرك، وعليه يتوجب أن يكون هذا العزم متناسباً مع الحمل المطلوب.

جدول 8-1 حروف ترميز قضبان محركات القفص السنجابي

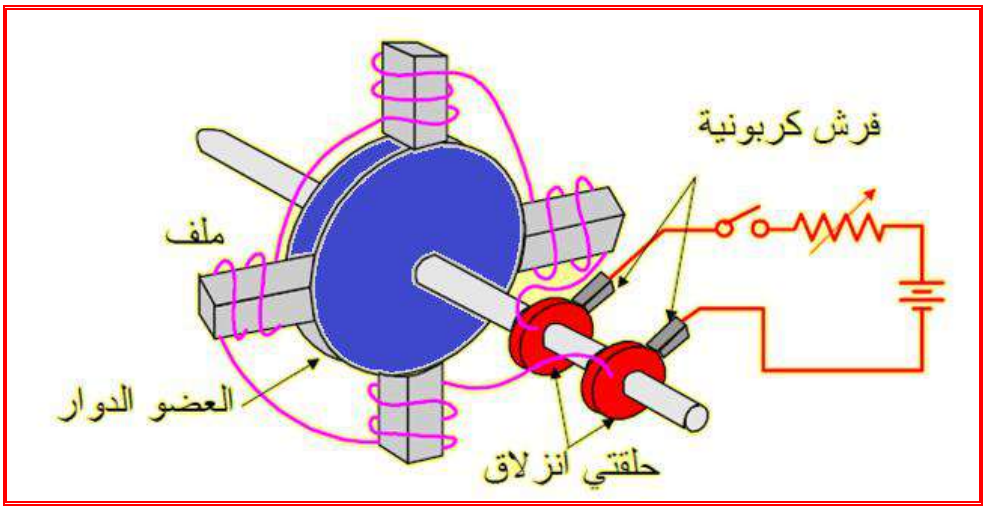
الرمز	كيلوفولت-أمبير لكل حصان	الرمز	كيلوفولت- أمبير لكل حصان
A	0 - 0.314	L	9.0 – 9.99
B	3.15 – 3.54	M	10.0 – 11.19
C	3.55 – 3.99	N	11.2 – 12.49
D	4.00 – 4.49	P	12.5 – 13.99
E	4.5 – 4.99	R	14.0 – 15.99
F	5.00 – 5.59	S	16.0 – 17.99
G	5.60 – 6.29	T	18.0 – 19.99
H	6.30 – 7.09	U	20.0 – 22.39
J	7.10 – 7.99	V	22.4 وأكثر
K	8.00 – 8.99		

8-1-2-2 المحركات التزامنية Synchronous Motors

هذا النوع من المحركات يمتاز بكفاءة عالية لتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية. وتولد المجال الدوار في العضو الثابت لهذه المحركات يكون مشابهاً لتولده في محركات التيار المتناوب الأخرى. كما تتشابه ملفات العضو الدوار للمحركات التزامنية مع ملفات المحرك الحثي ذي الملفات، إلا

إن ملفات المحرك التزامني تكون ملفوفة حول العضو الدوار بطريقة متصلة، كما مبين بالشكل (8-7). وتجدر الإشارة إلى أن المحركات التزامنية تغذى بمصدر تيار مستمر، ولهذا يتم استخدام حلقتا انزلاق فقط بدلاً من ثلاث حلقات، كما أن هنالك عدة طرائق لتزويد المحرك بالتيار المستمر، فمنها تتم باستخدام مولد للتيار المستمر باستخدام حركة المحرك ذاته، أو استخدام مغذي تيار إلكتروني يحول التيار المتناوب إلى تيار مستمر. ولبدء الحركة في المحركات التزامنية، تستخدم مجموعة من قضبان مشابهة لما هو مستخدم في المحركات ذات القفص السنجابي لبدء حركة العضو الدوار، وعند وصول السرعة بحدود 95% من سرعة المجال الدوار للعضو الثابت، يتم إيصال ملفات العضو الدوار بمصدر تيار مستمر عن طريق حلقات الانزلاق، ليتولد به مجال مغناطيسي يرفع سرعة الدوران للمحرك إلى السرعة التزامنية، مع قطع التيار عن قضبان بدء الحركة. ومن أهم خصائص المحركات التزامنية ما يأتي:

1- عدم اعتماد المجال المغناطيسي للعضو الدوار على مجال العضو الثابت.
2- تكون سرعة دوران المحرك ثابتة دون الاعتماد على الحمل.
3- للمحرك إمكانية تصحيح معامل القدرة له وللمحركات المربوطة على خط التيار نفسه.



شكل 8-7 عضو دوار لمحرك تزامني مع دائرة تيار مستمر لتغذية ملفاته

3-8 المحركات الكهربائية أحادية الطور Single Phase Electric Motors

غالباً ما تكون المحركات الكهربائية لأجهزة التثليج وتكييف الهواء قليلة السعة التثليجية والمستخدمة للأغراض المنزلية أو بعض الاستخدامات والتطبيقات الصغيرة، هي محركات كهربائية أحادية الطور، تستخدم تياراً متناوباً أحادي الطور.

ومن الدراسة السابقة في الفصل الثامن، لاحظنا إن المحركات ثلاثية الطور، تعتمد على المجال المغناطيسي الدوار في العضو الثابت، جعلها لا تحتاج إلى وسيلة بدء الحركة، على العكس من

المحركات أحادية الطور التي تحتاج إلى وسيلة لبدء حركتها، وذلك لعدم توافر المجال الدوار فيها. إذ أن محركات الطور الواحد تحتوي على ملف واحد في العضو الثابت، وهذا الملف غير قادر على توليد عزم الإدارة، ولهذا استخدمت طرائق عدة لتوليد عزم بدء الدوران وسُميت هذه المحركات باسم الطريقة المستخدمة لتوليد عزم البدء وعزم الدوران. والجدول (8-2) يبين بعض أنواع المحركات الأحادية شائعة الاستخدام في تطبيقات التثليج وتكييف الهواء.

ويجدر الإشارة إلى أن المحركات أحادية الطور عند وصولها إلى سرعتها المقررة تعمل تماماً كالمحركات ثلاثية الطور، لأن الطبيعة المتغيرة للتيار المتناوب تغير قطبية الملفات في الدورة الواحدة.

وفيما يلي شرح مبسط لهذه الأنواع المدرجة بالجدول (8-2)، وقد توجد بمصادر أخرى بأسماء قد تختلف بعض الشيء.

جدول 8-2 مواصفات المحركات الأحادية الطور شائعة الاستخدام

نوع المحرك	فرق الجهد V	القدرة hp
محرك الوجه المقسم		
1. ذو ملف بدء الحركة عالي المقاومة	115 و 230	0. 05 – 0.333
2. ذو متسعة بدء الحركة	115 و 230	0.05 – 0.5
3. ذو متسعة دائمة	115 و 230	0.05 - 5
4. ذو متسعة بدء الحركة ومتسعة دائمة	115 و 230	0.05 - 6
محرك القطب المشقوق	115 و 230	0.01 – 0.25

8-3-1 محرك حثي بمقاومة طور منقسم

Resistance Split-Phase Induction Motor

يكون العضو الدوار لهذه المحركات من نوع القفص السنجابي، ويحتوي عضوه الثابت على ملفين، الأول ملف التشغيل (ملف الدوران) (Running Coil)، الذي يصنع من أسلاك بأقطار كبيرة بعض الشيء وذات مقاومة كهربائية قليلة وذي ممانعة مغناطيسية عالية، والملف الثاني هو ملف بدء التشغيل (ملف التقويم) (Starting Coil)، الذي يصنع من أسلاك رفيعة عالية المقاومة الكهربائي وكما

موضح بالشكل (8-8 أ) إذ يوصل ملف الدوران مباشرة مع التيار فيما يوصل ملف التقويم على التوازي مع ملف الدوران في بداية التشغيل. إن الاختلاف في مقاومة الملفين سيؤدي إلى اختلاف في طوري التيار في الملفين مما يتسبب بتوليد مجال مغناطيسي دوار يؤدي لحركة العضو الدوار ذاتياً .

بعد بدء الدوران ووصول سرعة المحرك بحدود 75% من السرعة القصوى (سرعة الحمل الكامل) يقوم مفتاح (مرحل بدء الحركة) بفصل ملف بدء الحركة من دائرة العضو الدوار، لتزداد سرعة العضو الدوار ويعمل كمحرك تأثيري من نوع القفص السنجابي.

إن مرحل بدء الحركة، عبارة عن مفتاح طرد مركزي، وهو عضو ميكانيكي يحتوي على ثقلين، عندما يدور العضو الدوار للمحرك والحامل للمفتاح فإن هذين الثقلين يحاولان الابتعاد عن مكانهما بسبب قوة الطرد المركزي، وبهذه الحركة يسحبان معهما نقاط التوصيل الكهربائية.

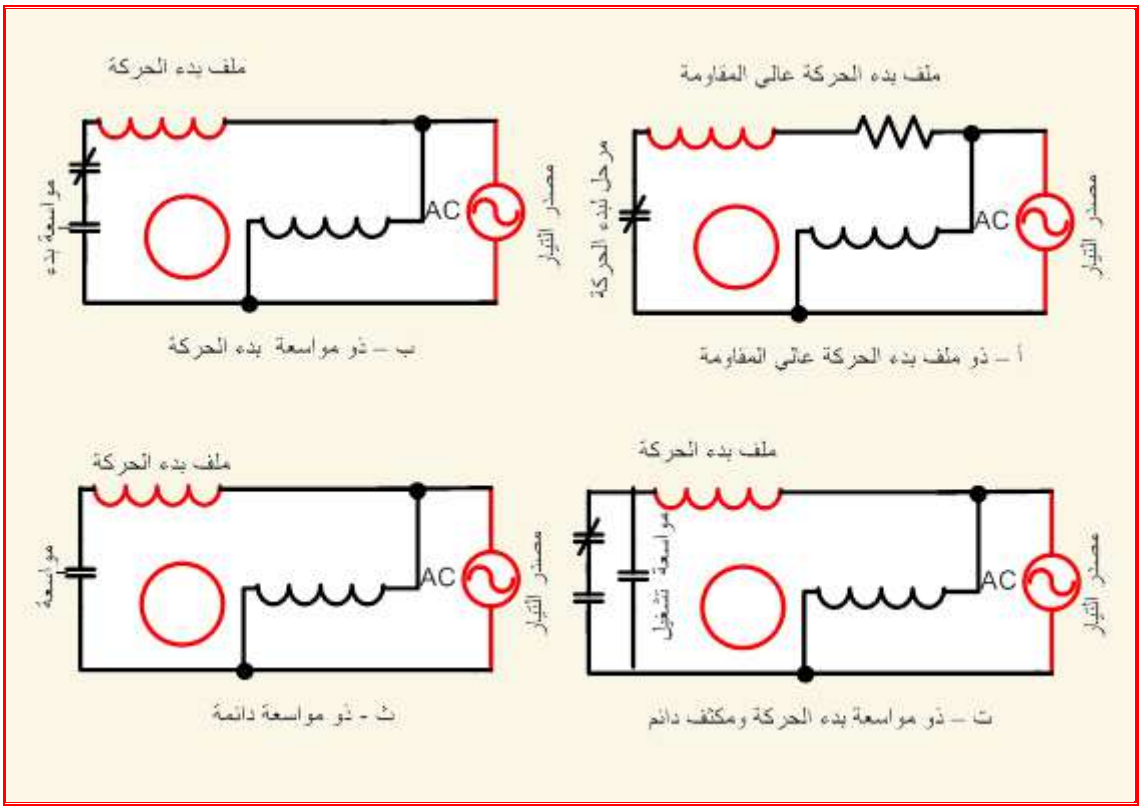
يكون هذا النوع من المحركات ذا عزم بدء حركة منخفض ويحتاج إلى تيار كبير نسبياً لبدء الحركة ويصنف للاستعمال العام ويستخدم في تشغيل المراوح الصغيرة. وكذلك يستخدم مع الضواغط الصغيرة حتى قدرة ($\frac{1}{3}$ hp) لمنظومات التثليج التي تستخدم الأنبوب الشعري مثل الثلاجات والمجمدات وبرادات الماء المنزلية.

8-3-2 محرك حثي بمتسعة لبدء الحركة Capacitor-Start Induction Motor

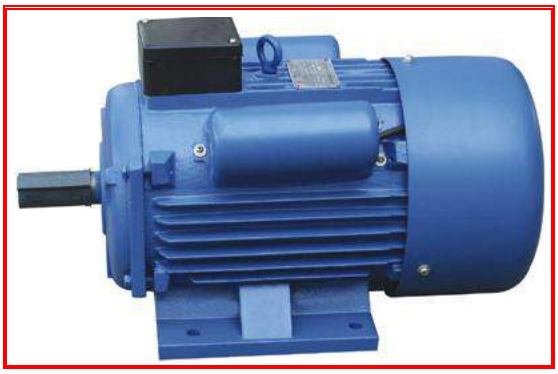
في هذا النوع من المحركات الأحادية الطور، يتم استخدام متسعة Capacitor تقويم (بدء الحركة) لزيادة عزم بدء الحركة، وتربط المتسعة في دائرة العضو الدوار على التوالي مع ملف بدء الحركة وكما هو مبين بالشكل (8-8 ب). ويستخدم لإدارة المراوح الصغيرة أو النافخات (Blowers) ذات الحمل العالي. ويبين الشكل (8-9) صورة لهذا النوع من المحركات.

غالباً ما تكون المتسعة المستخدمة في هذه المحركات من النوع الإلكتروليتي (الكيمياوي)، ويتم فصله من الدائرة بفعل مفتاح الطرد المركزي أو مرّحل، كما مر ذكره في محرك الوجه المقسم ذي ملف بدء الحركة عالي المقاومة، بعد وصول سرعة المحرك بحدود 75% من سرعة الحمل الكامل.

عند عطب المتسعة يُراعى استبدالها بأخرى ذات جهد مساوي أو أكبر من المتسعة الموصى بها من قبل المصنعين لضمان عدم تقليل عزم الحركة الابتدائية.



شكل 8-8 دوائر محركات أحادية الطور ذات طور مقسم



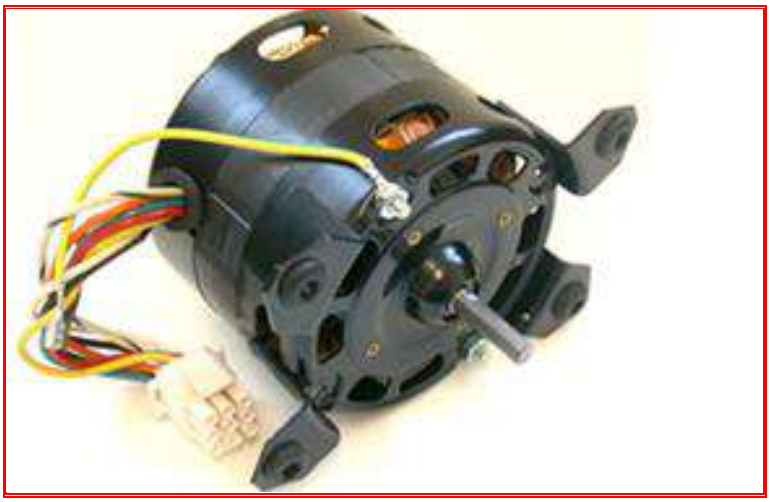
شكل 8-9 محرك حثي بمتسعة لبدء الحركة

8-3-3 محرك بمتسعة منقسمة دائمة

Permanent Split-Capacitor Motor

كما مبين في الشكل (8-8 ث)، قد يستعمل متسعة دائميه في دائرة العضو الدوار، وتربط مع ملف بدء الحركة على التوالي، وتبقى هذه المتسعة بشكل دائمي. إن استخدام هذه المتسعة يسهل عملية بدء التشغيل ويغني عن استخدام مرحل التيار، إلا أن عزم هذا المحرك يكون قليلاً عند بدء التشغيل. لكن هذه المحركات تكون ذات كفاءة عالية وتحتاج إلى تيارات كهربائية قليلة.

في هذا النوع من المحركات يتم استعمال متسعة الزيت بدلاً عن متسعة كيميائية لعدم صلاحيتها لمثل هكذا استخدامات. هذه المحركات تستخدم عادة مع مكيفات الهواء الجدارية التي تتراوح ما بين 2 إلى 5 حصان. ويبين الشكل (8-10) محرك بمتسعة منقسمة دائمة.

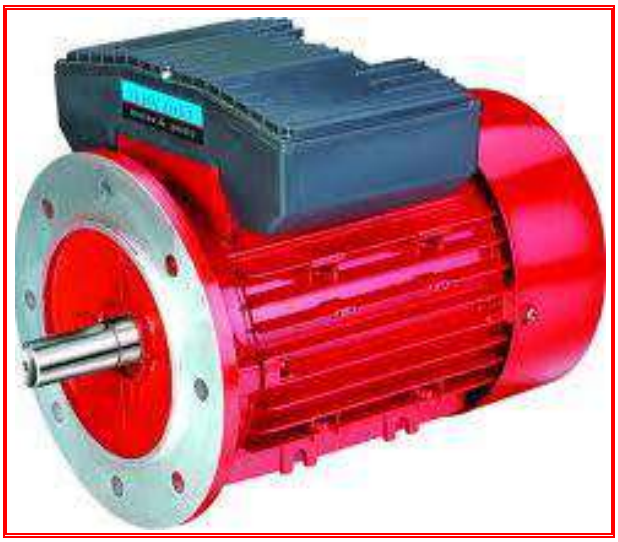


شكل 8-10 محرك بمتسعة منقسمة دائمة

8-3-4 محرك بمتسعة بدء الحركة ومتسعة دوران

Capacitor-Start, Capacitor Run Motor

إن هذا النوع من المحركات يبدأ الدوران بمتسعة بدء الحركة ويستمر بالدوران بمتسعة الدوران، ويبين الشكل (8-8 ت) الدائرة الكهربائية له، عند توصيل المصدر الكهربائي بالمحرك يتكون مسارين متوازيين الأول يتكون من ملف الدوران والمسار الثاني يتألف من ملف البدء موصل بالتوالي مع كلٍ من المتسعتين الموصولتين على التوازي فيما بينهما. عند وصول سرعة المحرك إلى 75% من سرعة الحمل الكامل يعمل ملف البدء كمولد فيولد قوة دافعة كهربائية عالية، تسبب قطع مسار التيار عن ملف البدء ومتسعة البدء. وتستخدم هذه المحركات في ضواغط أجهزة التكييف التي تتراوح قدرتها بين 2 إلى 5 حصان. ويبين الشكل (8-11) محرك بمتسعة بدء الحركة ومتسعة دوران.

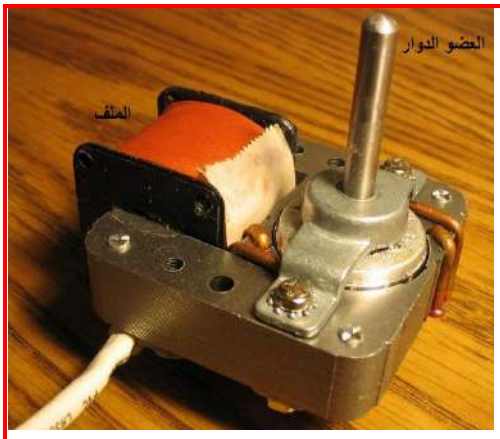


شكل 8-11 محرك بمتسعة بدء الحركة ومتسعة دوران

8-3-5 المحرك الحثي ذو القطب المظلل The shaded-Pole Induction Motor

كما في جميع المحركات الكهربائية يتكون المحرك الكهربائي ذو القطب المظلل من عضو ثابت وهو عبارة عن قطب بارز، في حين أن العضو الدوار عبارة عن قفص سنجاب، ويتكون العضو الثابت من شقوق تقطع خلال طبقات رقيقة من الصفائح ويمر خلالها ملف كهربائي يصنع من النحاس ويسمى هذا الملف بالملف المظلل، وكما موضح في الشكل (8-12 أ)، أما القطب الذي يتكون بفعل الملف المظلل فيسمى بالقطب المظلل، في حين أن الجزء الآخر من القطب فيسمى بالقطب غير المظلل. ويبين الشكل (8-12) العضو الثابت والعضو الدوار للمحرك الحثي ذي القطب المظلل. فإذا مر تيار متناوب خلال الملف الذي يحيط بالقطب، فسيحيد محور القطب المظلل عن محور القطب غير المظلل، وسيسبب هذا الحيود في المحاور حركة دورانية للقطب، وعلى هذا الأساس سيبدأ العضو الدوار بالدوران وباتجاه الحيود من القطب غير المظلل إلى القطب المظلل، تتميز هذه المحركات بأنها رخيصة الثمن وسهلة الصنع ومتينة، ولكن من ناحية أخرى تكون قليلة الكفاءة وذات عزم دوران ضعيف لذلك تستخدم كمحركات لمراوح الهواء الصغيرة جداً.

أ- القطب المظلل



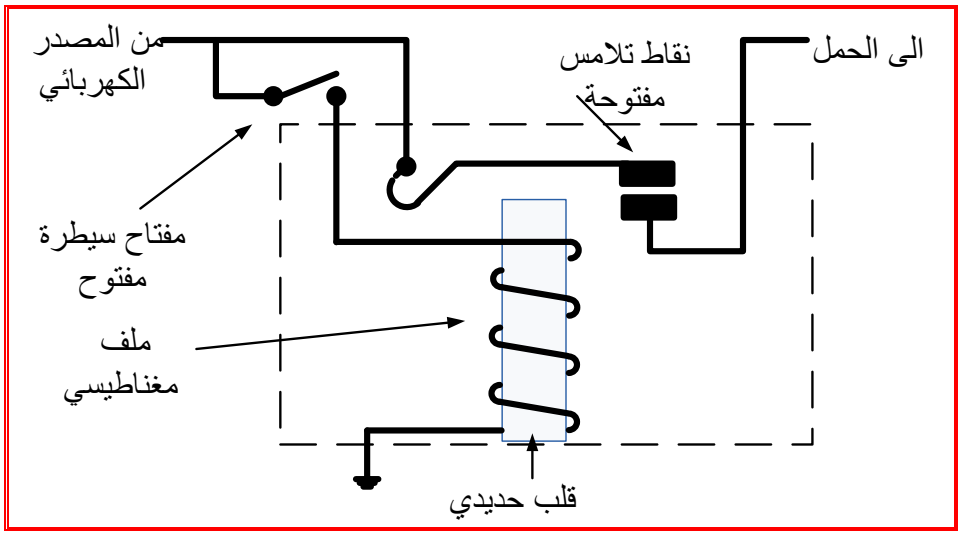
ب- محرك كهربائي ذو قطب مظلل

شكل 8-12 العضو الثابت والعضو الدوار للمحرك الحثي ذو القطب المظلل

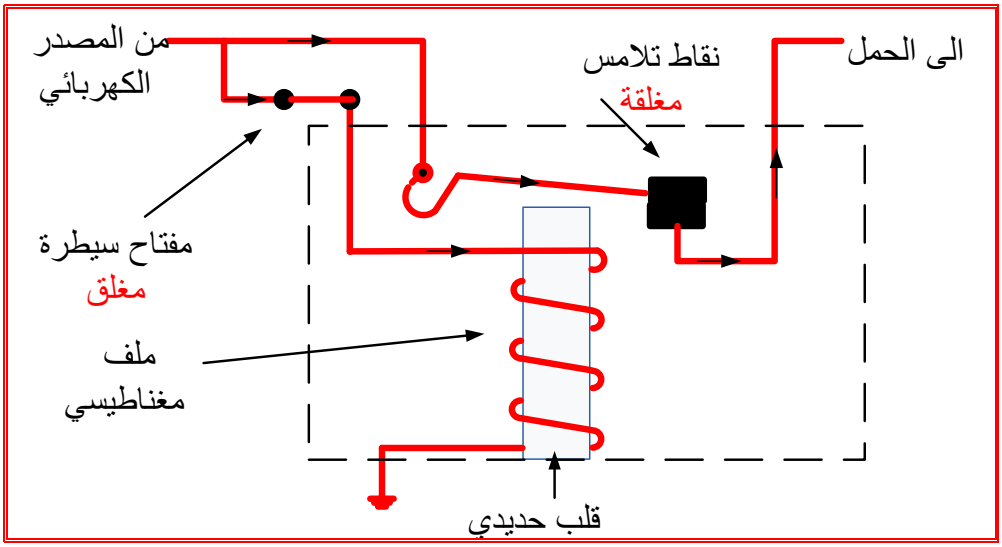
4-8 مُرَحلات بدء الحركة في محركات الطور المنقسم

Starting Relays for Split Phase Induction Motors

يمكن توضيح عمل المرَحل من خلال الشكل (8-13 أ) الذي يبين مقطعاً في المرَحل، ويتكون المرَحل من قلب حديدي محاط بملف كهربائي، ويمرر التيار إلى الملف المغناطيسي الذي يحيط بالقلب الحديدي عن طريق مفتاح سيطرة، وهنالك سلك آخر ينقل التيار إلى نقاط تلامس ومنها إلى الحمل، فعند غلق مفتاح السيطرة يمر التيار الكهربائي في الملف الممغنط مما يؤدي إلى تكون مجال مغناطيسي حول القلب الحديدي، يقوم المجال المغناطيسي بسحب الذراع العلوي لنقطة التماس مما يؤدي إلى غلق الدائرة الكهربائية وإيصال التيار الكهربائي إلى الحمل، وكما مبين في الشكل (8-13 ب). وإذا تم فصل التيار الكهربائي عن الملف الممغنط فإن المجال المغناطيسي سينعدم مما يؤدي إلى ارتفاع الذراع الأعلى لنقطة التماس بفعل دفع النابض المركب في نهاية الذراع مما يؤدي إلى فصل التيار الكهربائي عن الحمل.



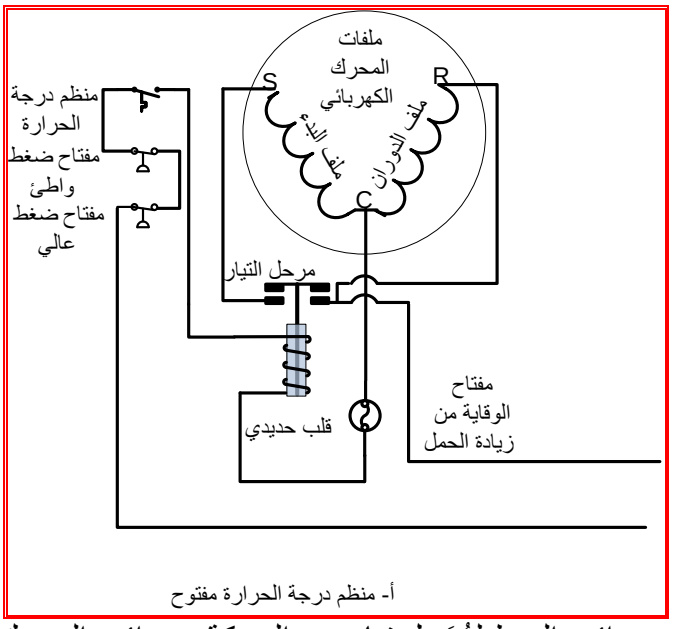
شكل 8-13 أ مقطعاً في مرحل التيار في حالة عدم إيصال التيار إلى مفتاح السيطرة



شكل 8-13 ب مقطعاً في مرحل التيار في حالة إيصال التيار إلى مفتاح السيطرة

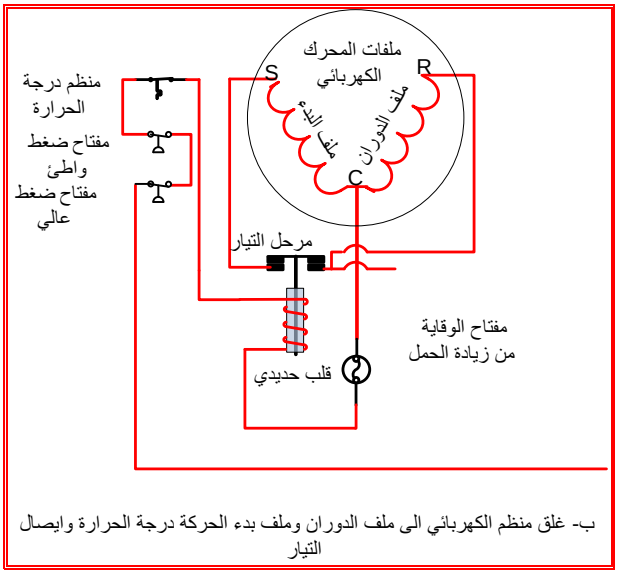
8-4-1 مُرَحل التيار Current Relay

يستعمل مُرَحل التيار مع المحركات التي تبدأ حركتها بمتسعة أو مع المحركات منقسمة الطور وبدون متسعة. ولا يختلف التركيبان عن بعضهما لا في العمل ولا في التركيب. إن هذا المرَحل هو من النوع المغناطيسي ويعمل نتيجة التغير في مرور التيار في ملفات العضو الدوار للمحرك خلال فترة بدء التشغيل والدوران. والشكل (8-14 أ) يوضح دائرة الربط لمرَحل تيار بدء الحركة مع دائرة المحرك مع عدم مرور التيار بسبب فتح مفتاح منظم درجة الحرارة.

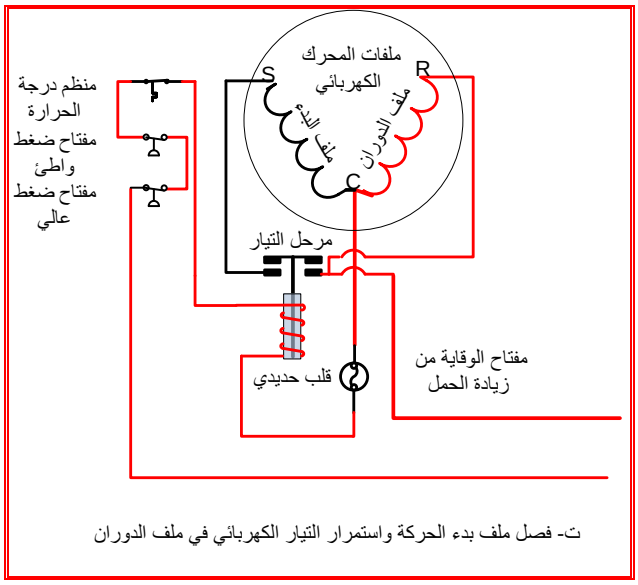


شكل 8-14 أ يوضح دائرة الربط لمُرَحل تيار بدء الحركة مع دائرة المحرك مع عدم مرور التيار بسبب فتح مفتاح منظم درجة الحرارة

فعندما يغلق مفتاح منظم درجة الحرارة كما في الشكل (8-14 ب) يمر التيار في الملف الممغنط مما يؤدي إلى سحب نقاط التماس وإيصال التيار الكهربائي إلى ملف بدء الحركة وملف الدوران، وعند بدء دوران المحرك يتركز التيار في ملفات الدوران بشكل كبير وعند وصول سرعة المحرك إلى 75% من سرعة المحرك الكلية فإن التيار المار في الملف الممغنط سوف يضعف بشكل كبير مما يؤدي إلى توقف الفيض المغناطيسي، وبالتالي ارتفاع نقاط التلامس، فيفصل التيار عن ملف بدء الحركة ويستمر مروره في ملف الدوران، وكما هو مبين في الشكل (8-14 ت). وتحدث هذا العملية بزمن قدره ثانية وربع الثانية تقريباً.



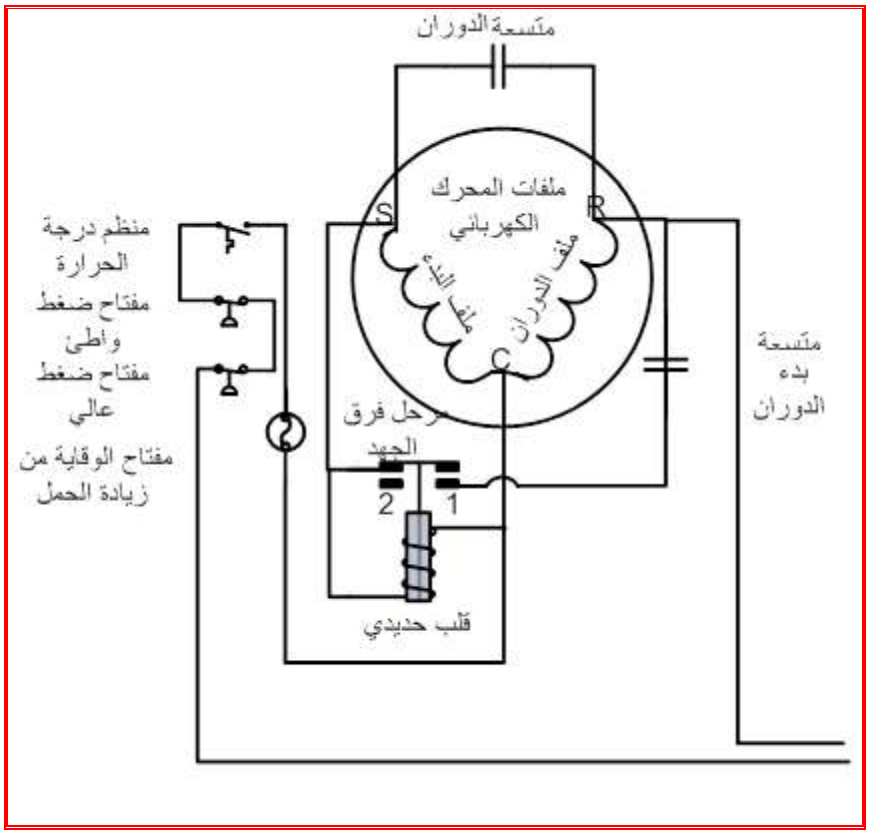
شكل 8-14 ب يمر التيار في الملف الممغنط مما يؤدي إلى سحب نقاط التماس



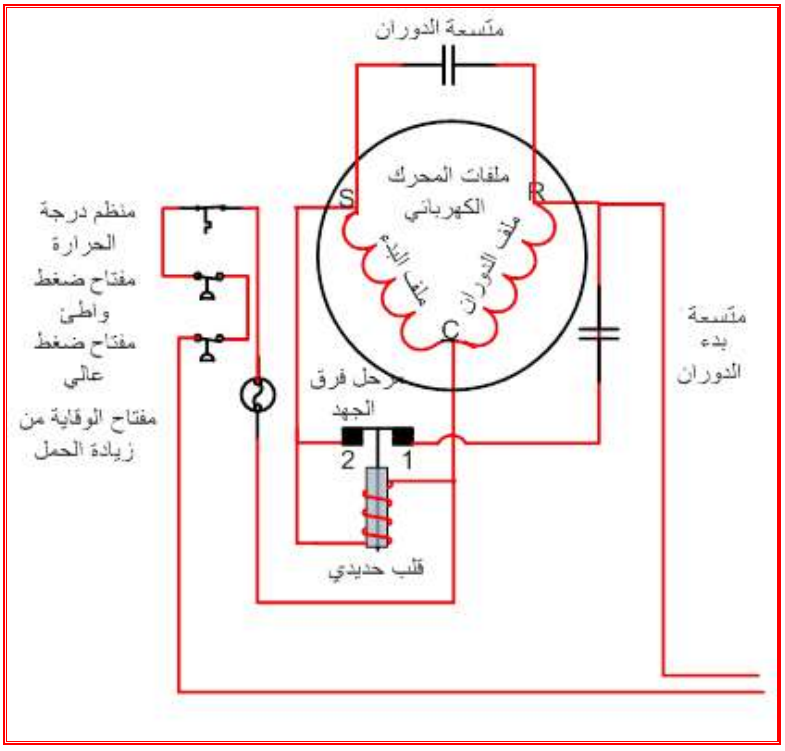
شكل 8-14ت فصل التيار عن ملف بدء الحركة ويستمر مرور التيار في ملف الدوران

8-4-2 مُرَحل الجهد Potential Relay

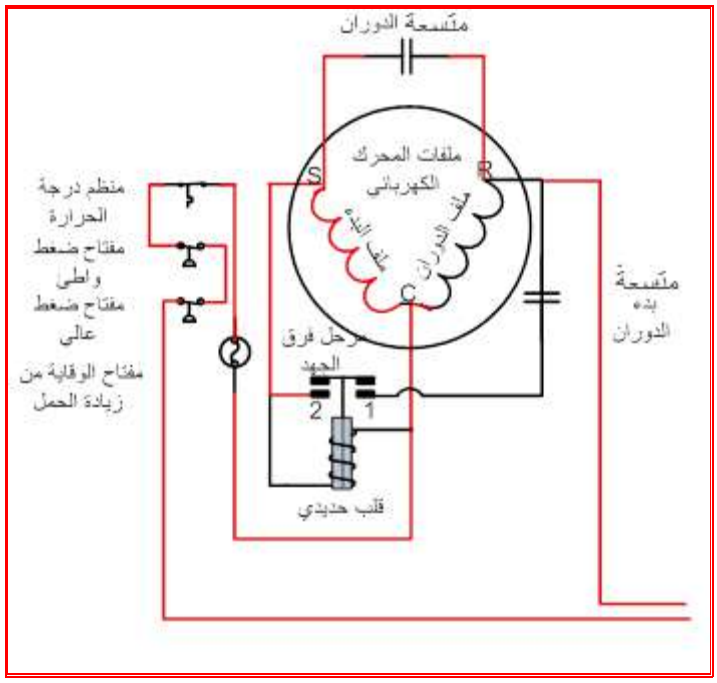
يستعمل ملف مُرَحل الفولتية في المحركات التي تبدأ حركتها بمتسعة ومع المحركات التي تبدأ حركتها وتدار بمتسعة. يختلف مرَحل الجهد عن مرَحل التيار من خلال كون ملفه يتكون من عدة لفات من سلك ذي مقاومة عالية ويوصل على التوازي مع ملفات بدء الحركة، ويوضح الشكل (8-15 أ) طريقة تركيب هذا المرَحل في دائرة المحرك. توصل نقطتا تلامس المُرَحل على التوالي مع متسعة بدء الحركة وتفتح في أثناء توقف المحرك فعند مرور تيار كهربائي في الدائرة يتمغنط قلب المرَحل مما يؤدي إلى توصيل نقاط التلامس عندها يمر التيار في جميع أجزاء الدائرة الكهربائية بضمنها ملفي بدء الحركة وملف الدوران، وكما هو مبين في الشكل (8-15 ب). وبعد بدء الحركة واستقرار سرعة المحركين تصل سرعة المحرك إلى 75% من سرعة المحرك يقل فرق الجهد بشكل كبير على ملف المرَحل مما يؤدي إلى توقف الفيض المغناطيسي وفصل نقاط التماس وبالتالي توقف مرور التيار الكهربائي في متسعة بدء الحركة وملف بدء الحركة، وكما هو مبين في الشكل (8-15 ت).



شكل 8-15 أ طريقة تركيب مرًحل فرق الجهد في دائرة المحرك الكهربائي



شكل 8-15 ب تكوَن فيض مغناطيس وتوصيل نقاط التماس ومرور التيار في الدائرة الكهربائية

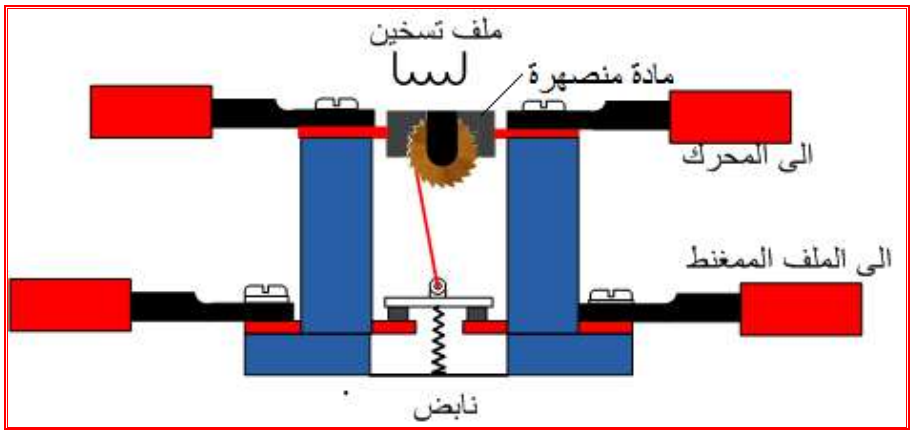


شكل 8-15 ت وصول سرعة المحرك إلى 75% من سرعته القصوى وفصل مُرَحل فرق الجهد

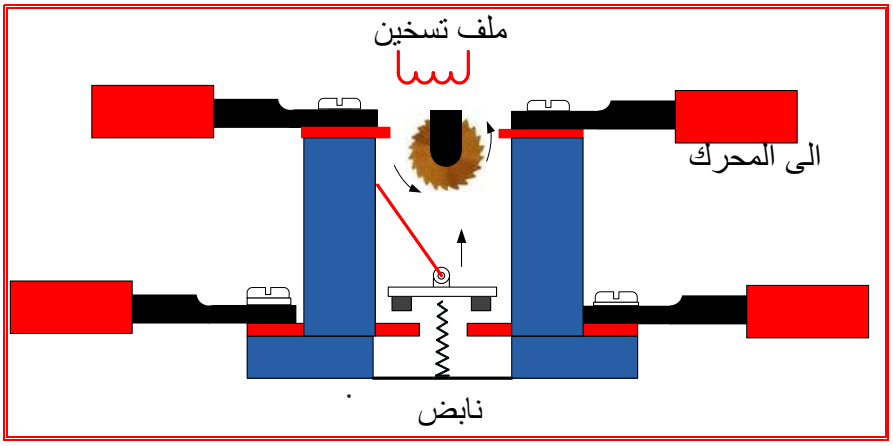
8-5 حماية المحركات من التحميل الزائد Overload Protection

تستخدم قواطع الوقاية من الحمل الزائد لحماية المحركات من التلف نتيجة الحمل الزائد، حيث ينتج أحياناً زيادة جهد المصدر الكهربائي عن الحد المقرر، والمصممة على أساسه ملفات المحركات، مما يتسبب بمرور تيار عالٍ في ملفات الدوران وإتلافها، ولمنع تلف المحرك فإنه يزود بقاطع للوقاية عند زيادة التيار. إن معظم مرحلات الحمل الزائد تعتمد على خاصية التأثير الحراري، كما إن وحدة الحماية يجب أن تكون حساسة للتيار الذي يسحبه المحرك، ولذلك فإن العنصر الحساس في دائرة الحماية والذي يعتمد على تسخين التيار العالي يجب ربطه على التوالي مع دائرة المحرك، وهنالك نوعان من أجهزة الحماية شائعة الاستخدام في تطبيقات تكييف الهواء والتثليج ، أحدهما يستخدم مادة لحام قابلة للانصهار عند مرور تيار عالٍ (Solder-Melting Material) والآخر يستخدم شريحة ثنائية المعدن (Bimetal). وفيما يلي توضيح لهاتين الطريقتين:

1- قواطع الوقاية من الحمل الزائد باللحام القابل للانصهار The Solder-Melting Type of Overload، يستخدم هذا النوع بشكل واسع في منظومات التثليج والتكييف، ويتكون هذا المرَحل من عجلة مسننة مثبتة على عمود داخل أنبوبة ثابتة، كما مبين بالشكل (8-16 أ) تكون الأنبوبة مثبتة بالعمود بواسطة مادة لحام. ويكون هنالك سلك تسخين ملفوف حول الأنبوبة ومتصل على التوالي مع المحرك، عند زيادة حمل المحرك، يزداد التيار المار خلال سلك التسخين، مما يؤدي إلى انصهار مادة اللحام وتحرير حركة العمود داخل الأنبوبة، ويقوم النابض بتحريك العجلة المسننة وتنفصل نقاط التلامس للمُرَحل، لاحظ الشكل (8-16 ب)، وبما إن نقاط التلامس مربوطة على التوالي مع ملف بادئ الحركة للمحرك، فسوف يفقد مغنطته ويسبب انفصال المحرك عن المصدر الكهربائي.

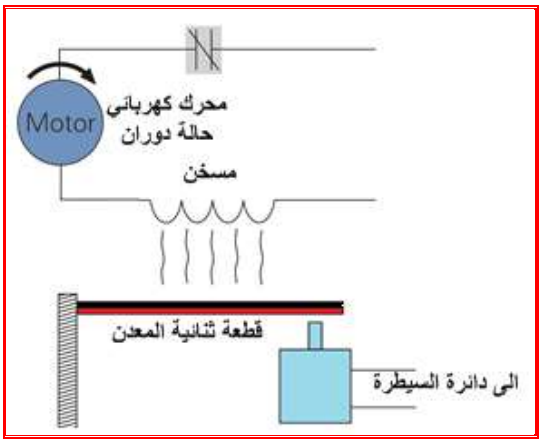


شكل 8-16 أ الدائرة الكهربائية تعمل بشكل طبيعي

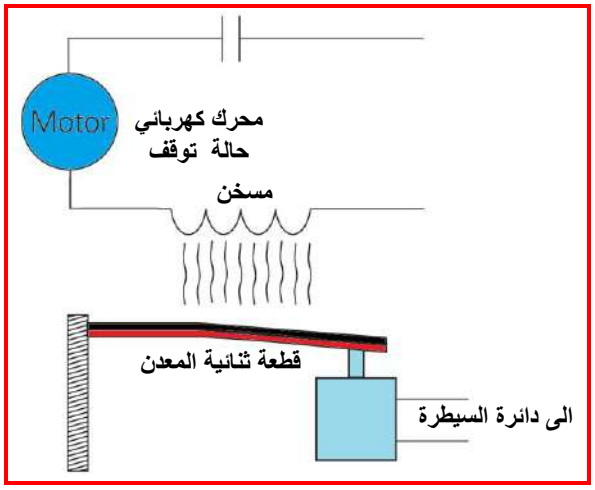


شكل 8-16 ب الدائرة الكهربائية بعد زيادة التيار وانصهار السلك

2- قاطع الوقاية من الحمل الزائد ذو شريحة ثنائية المعدن Bimetal Type of Overload، إن عمل هذا المُرّحل يكون مشابهاً لقاطع الوقاية باللحام القابل للانصهار، الذي تم ذكره في أعلاه، إلا أن الشريحة ثنائية المعدن هي التي تقوم بمهمة فتح نقاط التلامس للمُرّحل، كما في الشكل (8-17 أ)، حيث تقوم الشريحة بإغلاق نقاط التلامس نتيجة ضغط النابض، وعند التحميل الزائد سيمر تيار عالٍ في سخان المرَحل، الذي يقوم بدوره بتسخين الشريحة ثنائية المعدن ومن ثم انحنائها، وكما مبين في الشكل (8-17 ب). وعند انحناء الشريحة تفتح نقاط التلامس بفعل النابض، مما يؤدي إلى توقف المحرك نتيجة انقطاع التيار، وبعد زوال أسباب زيادة الحمل الكهربائي تبرد الشريحة المعدنية وتعود نقاط التلامس لوضع الغلق مرة أخرى.



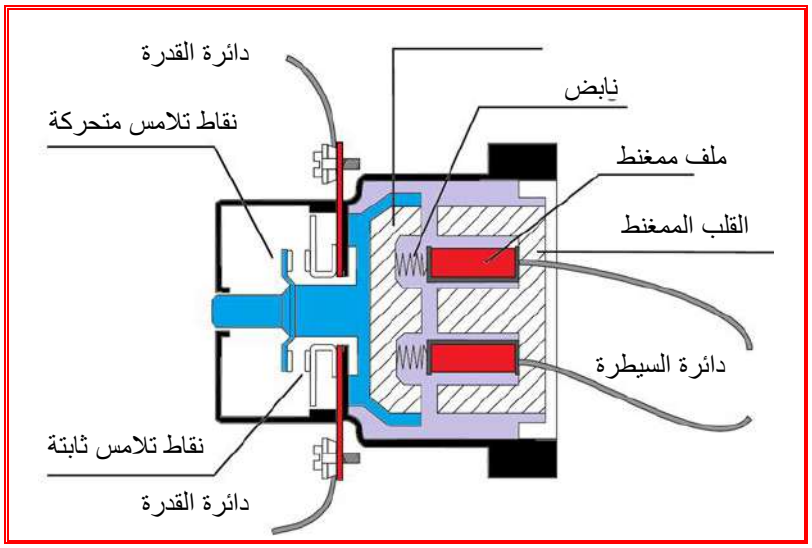
شكل 8-17 أ قاطع وقاية ذو شريحة ثنائية المعدن في حالة طبيعية



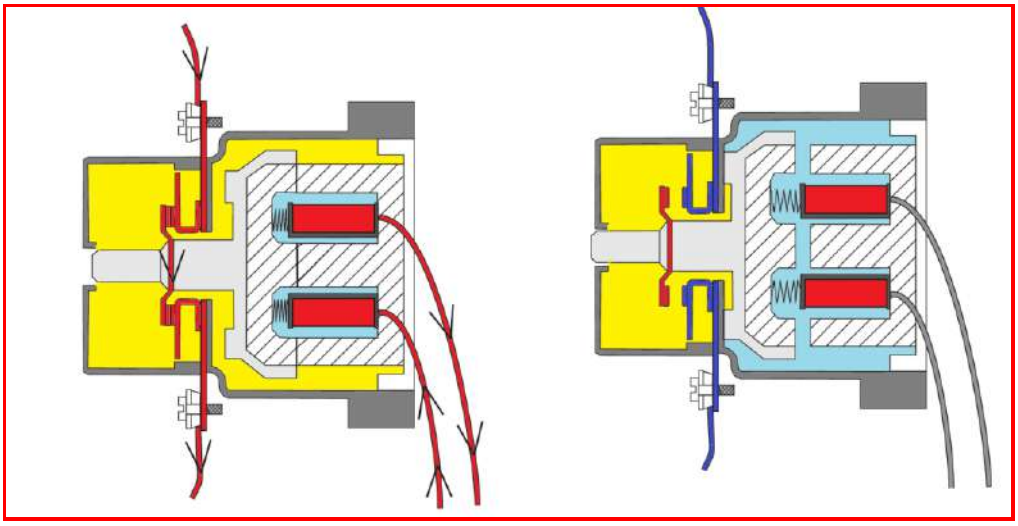
شكل 8- 17 ب قاطع وقاية ذو شريحة ثنائية المعدن في حالة فصل

8- 6 موصلات التيار ومفاتيح تشغيل المحرك Contactors and Motor Starters

تستخدم اللواقط المغناطيسية في أنواع مختلفة من دوائر التحكم وتدخل في مجالات كهربائية وإلكترونية عديدة. اللواقط المغناطيسية عبارة عن جهاز فصل ميكانيكي – كهربائي، يستخدم المجال المغناطيسي في إيصال أو فصل الدائرة الكهربائية، يتم تشغيله إما مباشرة بواسطة اليد أو عن بعد بواسطة مفاتيح خاصة. تختلف اللواقط المغناطيسية عن بعضها البعض باختلاف عدد الأقطاب فقد يكون ذا قطب واحد أو قطبان أو ثلاثة أو أربعة أقطاب. ويبين الشكل (8-18) تركيب اللواقط المغناطيسية. ويعمل اللاقط كما ذكرنا عن طريق مرور تيار كهربائي في ملف اللاقط مما يؤدي إلى تولد فيض مغناطيسي في ملف اللاقط، ويقوم الفيض المغناطيسي بسحب قاعدة النقاط المتحركة للاقط ويصلها بنقاط التلامس الثابتة، وكما هو مبين في الشكل (8- 19 أ) والشكل (8-19 ب). في حين أن الشكل (8-20) يبين بعض أنواع اللواقط.



شكل 8-18 التركيب الداخلي للاقط مغناطيسي



أ- لاقط مغناطيسي في حالة فصل ب – لاقط مغناطيسي في حالة توصيل

شكل 8-19 طريقة عمل اللاقط المغناطيسي

شكل8-20 أنواع اللواقط المغناطيسية

أسئلة الفصل الثامن

س1: عرّف ما يأتي:

الموصل ، العضو الدوار ، العضو الثابت ، المحرك الكهربائي ، المُرَحل ، المحرك التزامني.

س2: ما هي كل من:

أ- أنواع المحركات ثلاثية الطور؟

ب- أنواع المحركات أحادية الطور؟

ج- الفروقات بين المحركات ذات الأطوار الأحادية والثلاثية؟

د- خصائص المحركات التزامنية؟

س3: وضّح بالرسم مع التأشير على الأجزاء لكل مما يأتي:

أ- عضو دوار لمحرك ثلاثي الطور مع مقاومات بدء التشغيل.

ب- عضو دوار لمحرك تزامني مع دائرة التيار المستمر المغذية لملفاته.

س4: قارن بين الأنواع الأربعة من المحركات أحادية الطور ذات الطور المنقسم، من ناحية الدوائر الكهربائية ، التركيب ، وطريقة بدء الحركة.

س5: اشرح مبدأ عمل المحركات الكهربائية، وطريقة عمل المحركات الحثية ذات العضو الدوار ذي الملفات.

س6: اشرح أحد طرائق بدء الحركة لمحرك حثي ذي القفص السنجابي.

س7: اشرح موضحاً بالرسم كلاً مما يأتي:

أ- مُرَحل التيار.

ب- مُرَحل الجهد.

ت- مُرَحل الحمل الزائد باللحام القابل للذوبان.

ث- مُرَحل الحمل الزائد ذي شريحة ثنائية المعدن.

س8: كيف يتكون المجال الدوار داخل العضو الثابت لمحركات ثلاثية الأطوار؟