انتقال الملوثات إلى الهواء

إن أي حالة تلوث هوائي في أية منطقة يحكمها عدة عوامل منها حجم الملوثات المنبعثة من مصادرها المختلفة وسرعة انتقال هذه الملوثات ومدى تخفيفها بالهواء النقي بالإضافة إلى العوامل الجوية المؤثرة.

العوامل الجوية المؤثرة في انتقال ملوثات الهواء

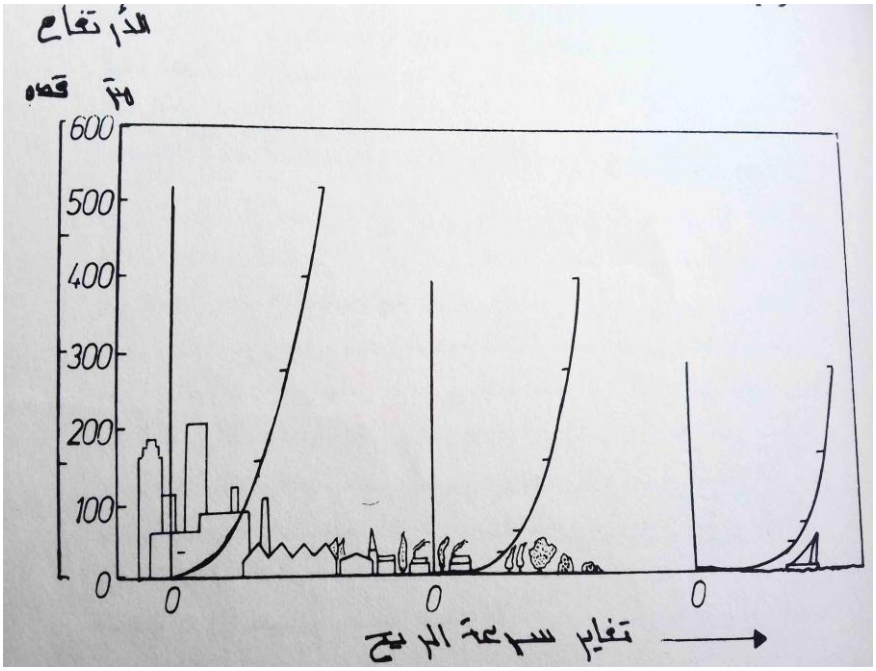
منطقة التروبوسفير:

تعتبر منطقة التروبوسفير التي يبلغ ارتفاعها بين (11 -18) كم تحوي 80% من كتلة الغلاف الجوي ، إذن فإن معظم الموارد الهوائية محصورة في المناطق القريبة من الأرض .

تعتبر التيارات الهوائية في منطقة التروبوسفير في اضطراب ومزج مستمر وحالته هي التي تحدد الحالات الجوية على سطح الأرض من ارتفاع وانخفاض في الضغط الجوي إلى تحرك كتل الغيوم واقتراب وابتعاد موجات الحر والبرد وفي الحقيقة فان طبقة التروبوسفير تستمد طاقتها من أشعة الشمس ومن الحرارة المنعكسة من سطح الأرض .

الرياح : تتبع مسارات الرياح النظام الحراري السائد للأرض من خط الاستواء إلى القطب الشمالي وكذلك يؤثر دوران الأرض حول نفسها على مسارات الرياح ،إضافة إلى هذه المسارات الرئيسية هنالك حركة رياح محلية سببها تسخين وتبريد الكتل الهوائية فوق منطقة ما ولهذه الرياح المحلية أهمية كبيرة في إبعاد الملوثات عن المدن. وقد يتأثر المسار العام للريح بسبب عوارض أو ظواهر محلية فعلى سبيل المثال وجود سطح مائي يتحكم في تغيير مسار الريح ليلا أو نهارا وكذلك السلاسل الجبلية تحرف الاتجاه العام لمسار الريح.
و تكون سرعة الريح فوق الطبقة الحدودية (600) م تقريبا للجو ثابتة في حين تتناقص سرعة الرياح مع الاقتراب من سطح الأرض وتعيق العوارض الأرضية حركة الرياح وتبطئها في حين لا تؤثر هذه العوارض خارج الطبقة الحدودية للجو .

شكل يبين تأثير العوارض الأرضية على سرعة الريح



<u>زهرة الريح</u> : هو مخطط يعبر عن سرعة واتجاه الريح لموقع ما بشكل تخطيطي حيث ترسم بناء على معلومات إحصائية عن سرعة واتجاه الريح لفترة زمنية طويلة . <u>ولزهرة الريح أهمية كبيرة في الدراسات البيئية خاصة المتعلقة باختيار المواقع الصناعية والسكنية .</u>

شكل يبين مخطط زهرة الريح

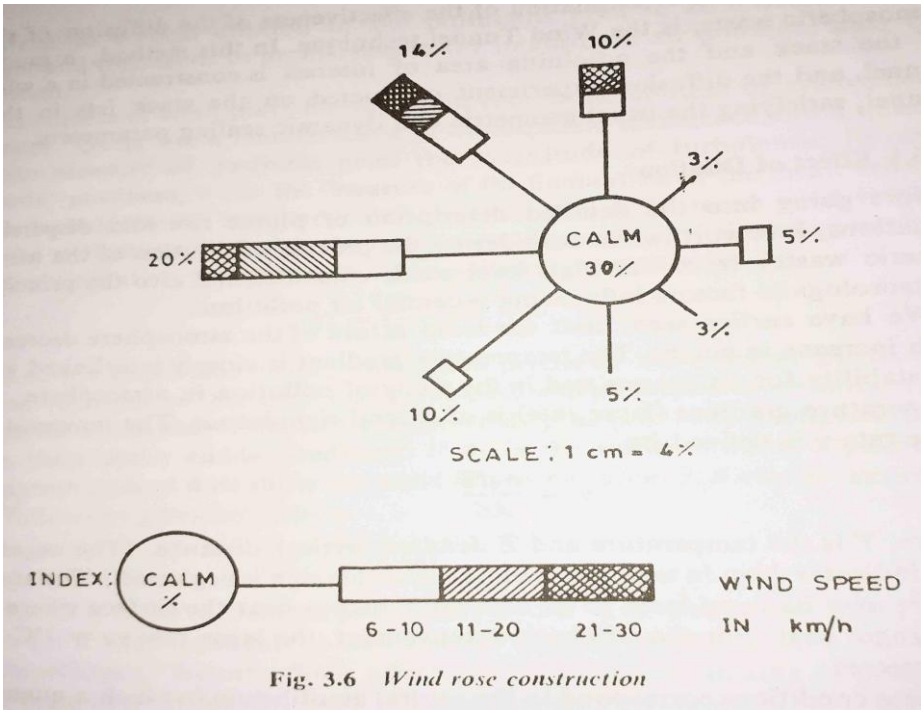


Fig. 3.6 *Wind rose construction*

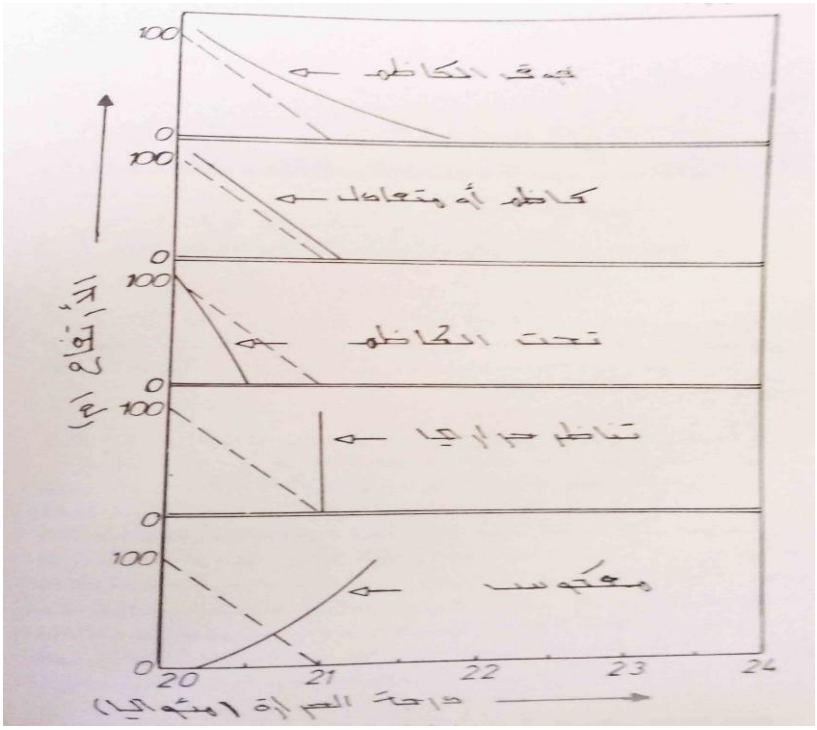
العلاقة بين الارتفاع عن سطح الأرض ودرجة الحرارة

العلاقة بين الارتفاع عن سطح الارض ودرجة الحرارة

لنأخذ كتلة من الهواء القريبة من أرض مدينة ملوثة فهي تحت ضغط جوي (760) ملم زئبق وعندما تسخن هذه الكتلة لتماسها مع الأرض أو الأبنية المسخنة بأشعة الشمس فإنها سوف تتمدد خلال صعودها وهذا سيكون على حساب حرارتها حيث نفترض عدم وجود تبادل حراري بين هذه الكتلة والكتل المتاخمة لها وهذه الحالة تدعى بالحالة الكاضمة (adiabatic) . وعندما تكون هذه الكتلة جافة فإن فقدانها الحراري سيكون بحدود 10 درجات مئوية لكل 1000 م صعود في الجو وستستمر مثل هذه الكتلة بالصعود مادامت كثافتها أقل من كثافة الهواء المتاخم لها، أو بكلمة أخرى ما دام الانخفاض الحراري للهواء المتاخم مع الارتفاع يفوق انخفاض درجة حرارة الكتلة الهوائية. ومعدل الانخفاض في درجة حرارة الهواء مع الارتفاع يدعى بمعدل الهبوط البيئي (Environmental Lapse rate)والسائد هي الحالات التالي:

1- فوق الكاظم (Super Adiabatic) وفيه تنخفض درجة الحرارة بأكثر من 10 درجات مئوية لكل 1000 متر الارتفاع .
2- المتعادل أو الحيادي (Neutral) وفيه يكون انخفاض درجة الحرارة 10 درجات مئوية لكل 1000 متر ارتفاع .
3- تحت الكاظم (Sub- Adiabatic) وفيه تنخفض درجة الحرارة أقل من 10 درجات مئوية لكل 1000 متر الارتفاع .
4- التناظر الحراري (Isothermal) عند هذه الحالة تكون درجة الحرارة ثابتة مع الارتفاع .
5- المعكوس (Reversed) في هذه الحالة هنالك زيادة في درجة الحرارة مع الارتفاع.

خطط يبين معدلات الهبوط التقليدية بالمقارنة مع معدل الهبوط الكاظم



فوق الكاظم (Super Adiabatic): تحدث حالة فوق الكاظم في اليوم الشديد الإشراق حيث يسخن سطح الأرض بسرعة كبيرة مما يؤدي إلى تسخين الكتل الهوائية القريبة من الأرض بسرعة بحيث يكون تغير درجة الحرارة الهواء مع الارتفاع أكثر من 10 درجات مئوية ، وهذا يحدث غالبا في الارتفاعات الجوية التي لا تتجاوز 200 م وفي هذه الحالة فان أية كتلة هوائية آتية من مصدر تلوث سترتفع وتتمدد بشكل كاظم وهذا يجعل درجة حرارتها أعلى من الهواء المجاور لذلك ستستمر في الارتفاع إلى أن تتغير الحالة وتتساوى كثافتها مع الهواء المتاخم لها .تعتبر حالة فوق الكاظم محبذة لأن الملوثات سوف ترتفع إلى الأعلى بسرعة وتخفف من تأثير التلوث .

المتعادل أو الحيادي(Neutral) : أما إذا كان المعدل السائد للجو هو المتعادل فانه لا يتوقع أن ترتفع في مثل هذا الجو كتل الهواء وذلك لأن درجة حرارتها وكثافتها ستكون مشابهة للهواء المتاخم لها ولكن مثل هذه الكتلة يسهل تحريكها إذا توفرت قوى أخرى مثل الحركة الأفقية والصاعدات للتيارات الهوائية المتسببة من عوامل غير عامل فروق الكثافة .

تحت الكاظم (Sub- Adiabatic) و التناضر الحراري (Isothermal) : أما إذا كان الجو في حالة معدل تحت الكاظم أو تناظر حراري فان ارتفاع أي كتلة هوائية سيجعلها ابرد من الهواء المتاخم وبذلك تنزل ثانية إلى تحت لتحتل موقعها حسب كثافتها . وتمثل هاتان الحالتان لمعدلات الهبوط البينية مشكلة بالنسبة لنشر الملوثات الهوائية خارج مناطق انبعاثها وتعتبر حالة التناظر الحراري هي الأعقد .

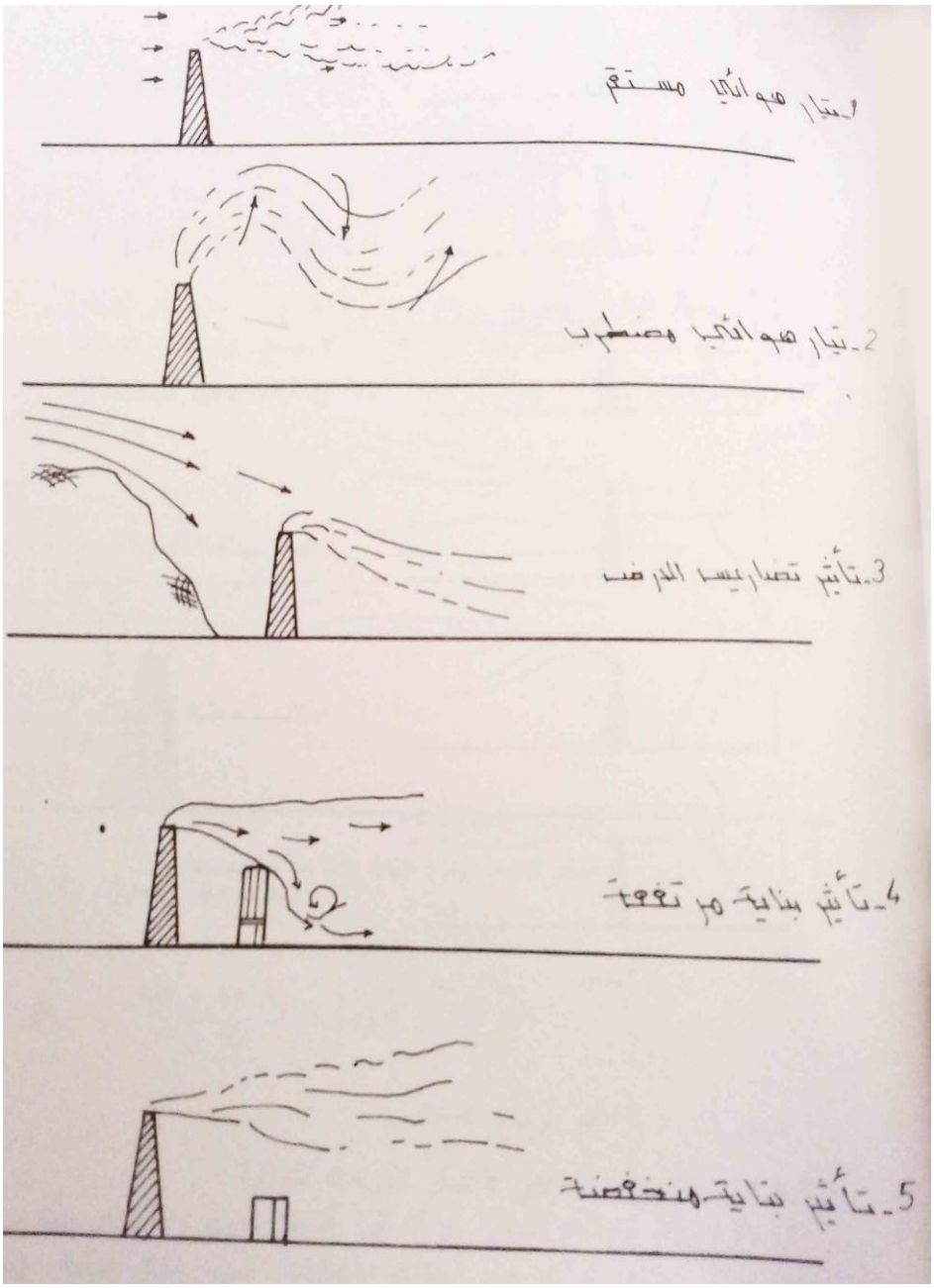
المعكوس (Reversed): النوع المعكوس يعني إن الهواء البارد تحت والساخن فوق وان طبقات الهواء منظمة حسب كثافتها ولكن بعكس النظام الحراري وفي هذه الحالة عند انبعاث اي كتلة هوائية فإنها بمجرد ارتفاعها قليلا سوف تبرد ولكنها ستجد نفسها في جو اسخن منها اي اقل كثافة منها لذلك سوف تهبط آو على الأقل تستقر في موقعها وفي هذه الحالة تتجمع الملوثات الهوائية تحت طبقة من الجو التي في حالة هبوط معكوس، وهذا ما حدث في معظم كوارث التلوث الهوائي في المدن . الهبوط المعكوس غالبا يحدث عند ارتفاع 500 م أو أكثر وتكون حالة الطبقة التي تحته من النوع المتعادل لذلك تنتشر الملوثات بانتظام خلال هذه الطبقة وتبقى الطبقة المعكوسة التي فوقها حاجزا بين هذه الملوثات وتيار الهواء النقي الواقع فوق الطبقة المعكوسة وسبب هذا النوع من الطبقة المعكوسة هو انحسار عكسي للهواء في منطقة ضغط عال حيث ترتفع درجة حرارة الهواء نتيجة انضغاطه . إن أهمية توقع أسلوب انتقال الملوثات في جو مدينة يعد ضروريا جدا لتوقع التراكيز التي يحتمل أن تبلغها ملوث ما في منطقة معينة .

حركة دخان المداخن وتأثير التضاريس الأرضية والأبنية المرتفعة

الدخان المنبعث من المدخنة يكون ساخن ويخرج بسرعة وله قصور ذاتي يستمر بالارتفاع بعد مغادرته المدخنة وان سخونة الدخان سيجعل له كثافة اقل من كثافة الهواء ولذلك سوف يرتفع ويطفو فوق الهواء المجاور. وتؤثر الأبنية المجاورة وبعض التضاريس في مسار الغمامة وإذا كانت سرعة الدفق الخارج من المدخنة قليلة مقارنة بسرعة الهواء الأفقية فان الغمامة سوف تنسحب باتجاه منطقة الضغط المنخفض جوار المدخنة ولا يحدث مثل هذا التأثير على الغمامة عندما تكون سرعة دفق الدخان من المدخنة ضعف سرعة الريح . كذلك عند وجود بناية كبيرة

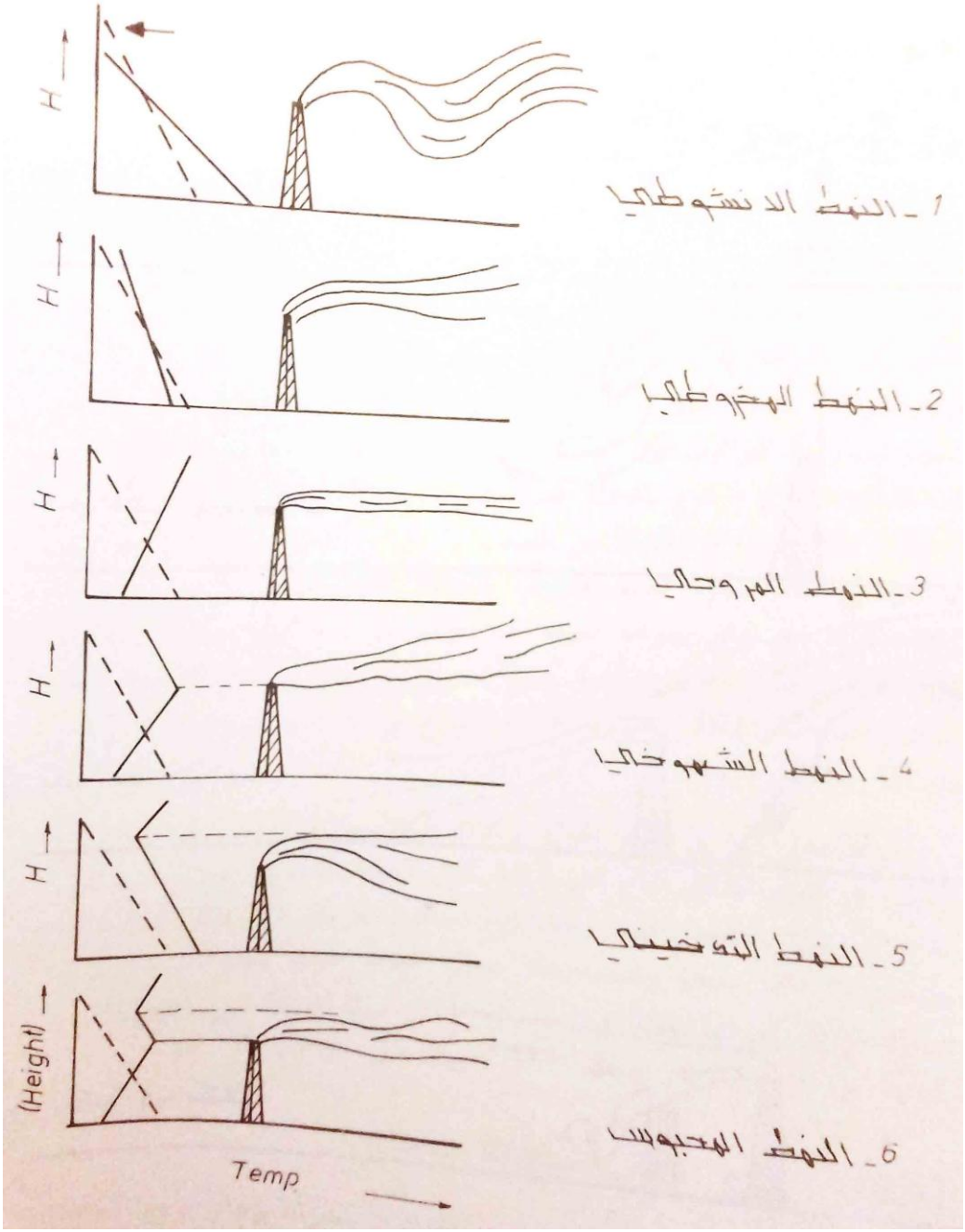
قرب المدخنة فان الغمامة سوف تنحرف نتيجة للتيارات الهوائية حول البناية المذكورة ، وكقاعدة عامة وحتى لا تحصل مثل هذه التأثيرات فان ارتفاع المدخنة يجب ان يكون على الأقل مرتين ونصف بقدر ارتفاع البنيات المجاورة. وفي الحقيقة من الصعب بل من المستحيل توقع مصير الغمامة في حالة وجود أبنية مجاورة

شكل يبين تأثير التيار الهوائي والتضاريس والأبنية على شكل انتشار الغمامة



الشكل التالي يبين مجموعة من الأنماط مع ذكر حالة الهبوط التي تصاحب كل نمط

Effect of atmospheric lapse rates and stack heights on plume behavior



_ _ _ _ _ Adiabatic lapse rate

بعض التعاريف المهمة في حركة الدخان

هنالك ستة أنواع من تصرفات الدخان الصاعد حيث يعتمد على درجة حرارة الجو مع الارتفاع وهذه الأنواع كما يلي :

1- Looping : وهو النوع الذي تكون فيه شكل الغمامة الدخانية على شكل موجة ويحدث في ظروف غير مستقرة جدا حيث يحدث مزج سريع والذي يساعد على تشتت الملوثات الغازية بسرعة ولكن يمكن أن يحصل زيادة في تركيز الملوثات القريبة من المدخنة إذا حدث وان لا مست الغمامة سطح الأرض.

2- Coning : وفيه تأخذ الغمامة الدخانية شكل قمع ويحدث غالبا في الظروف الجوية المستقرة (الحالة الكاظمة) عندما تكون سرعة الريح أكثر من 32 كم /ساعة . الغمامة تلامس الأرض بمسافة ابعد من النوع الأول اللولبي .

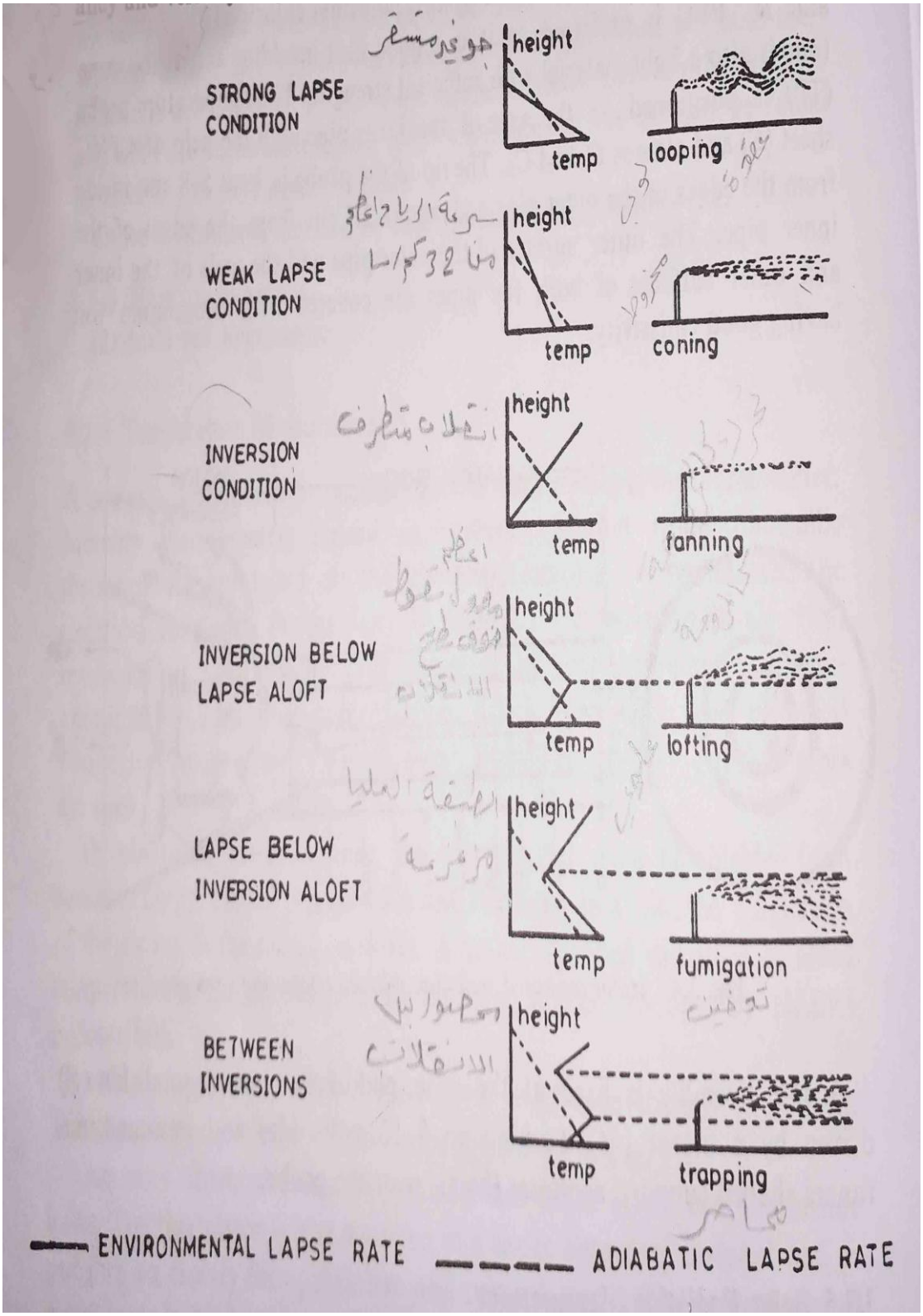
3- Fanning : يحدث هذا النوع تحت ظروف انقلاب متطرف حيث أن الغمامة تحت هذه الظروف سوف تنتشر أفقيا ولكن نوعا ما إلى الأعلى ولهذا سوف يكون التنبؤ في مكان التركيز الأعظم للغمامة على سطح الأرض صعب نسبيا .

4- Lofting : يحدث هذا النوع عندما يكون هنالك معدل هبوط بيئي قوي strong lapse rate above surface inversion ولهذا يحدث تشتت سريع نحو الأعلى بينما أسفل الغمامة لا تستطيع من النفاذ إلى منطقة الانقلاب وبذلك سوف لا تلامس الغمامة سطح الأرض .

5- Fumigation : ويعني الشكل التدفيني أي تحاول الغمامة أن تندفن أي تحاول أن تنزل بسرعة إلى الأرض ويحدث غالبا عندما تكون درجة حرارة الجو فوق المدخنة أعلى من أسفلها وتحث في ظروف جوية غير مستقرة

6- Trapping : ويعني الشكل المحصور حيث تكون الغمامة محصورة من الأعلى والأسفل بظروف جوية ساخنة وبذلك لا تستطيع أن تنتشر ضمن الارتفاع العمودي سواء إلى الأعلى أم إلى الأسفل

- يعتبر نوع Lofting مفضل لأنه سوف يقلل من انتشار الملوثات
- يعتبر النوعان Fumigation و Trapping من الإشكال الحرجة جدا بسبب احتمال تركز الملوثات بصورة قريبة من نقطة الانطلاق
- يمكن الاستفادة من معرفة الأنماط السابقة الذكر في تحديد أمكنة اخذ نماذج الهواء



ومنطقة المزج ومعامل التنفيس

Mixing depth and Ventilation coefficient

عمق المزج Mixing depth : هو أعلى ارتفاع تصله طبقة المزج
(The altitude of the top of the mixed layer)

معامل التنفيس ventilation coefficient :

هو الناتج من حاصل ضرب سرعة الريح في عمق المزج وحدته m^2/S وهو مؤشر على قابلية الغلاف الجوي على تشتيت الملوثات فإذا كانت قيمته اقل من 6000 m^2/S فانه يعطي دلالة على إمكانية حدوث تلوث عالي.

تغير سرعة الرياح مع الارتفاع

Wind Changes with elevation

غالبا تقاس سرعة الريح بواسطة جهاز الانيمومیتیر (anemometer) وغالبا يوضع على ارتفاع 10 م فوق سطح الأرض ومن ثم تقاس بالمعادلة التالية :

$$(U_H/Ua)=(H/Za)^{\beta}$$

U_H=Wind speed at the elevation H

Ua= Wind speed at the anemometers height

H=effective height of the plume

Za= anemometers height above the ground

β=a dimensionless parameter that depends on surface roughness and atmospheric stability

مثال: افترض أن جهاز الانيمومیتر وضع على ارتفاع 10 م فوق سطح الأرض وكانت سرعة الريح عنده 2.5 م/ثا ، ما هي سرعة الرياح في أعلى سطح مدخنة ارتفاعها 300 م إذا كان الغلاف الجوي نوعا ما غير مستقر ؟

Solution :

$$(U_H/Ua)=(H/Za)^{\beta}$$

$$U_H= Ua\ (H/Za)^{\beta}$$

β =0.2 from the above table

U_H $=2.5(300/10)^{0.2}$ =4.9 m/s

Wind profile Exponent (β) for rough terrain

Stability Class	**description**	**Exponent (β)**
A	Very unstable	0.15
B	Moderately unstable	0.15
C	Slightly unstable	0.2
D	Neutral	0.25
E	Slightly stable	0.4
F	stable	0.6

Note : For Smooth Terrain , multiply β by o.6

Atmospheric stability classification					
	Dry solar insolation			**Night cloudiness**	
Surface wind speed (m/s)	**Strong**	**Moderate**	**Slight**	**Cloudy**	**clear**
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

التمثيل الرياضي لانتشار الملوثات الغازية

إن الملوثات المنبعثة من المدخنة تختلط بالهواء وحال خروجها من المدخنة تنخفض تراكيز هذه الغازات والجسيمات المحمولة خلال الغمامة ومع استمرار اندفاع الغمامة باتجاه الريح السائدة فان التخفيف يستمر ومن أولى محاولات تمثيل انتشار الملوثات الهوائية بصورة رياضية هو (قانون ستن) الذي استخدم لسنوات طويلة في توقع تراكيز الملوثات على مسافات مختلفة من مصدر انبعاثها . ومن عيوب هذه العلاقة إنها تفرض استواء الأرض بصورة مطلقة وتفرض ريحا ثابتة السرعة والاتجاه وحالة جوية متعادلة بالإضافة إلى ذلك إن العلاقة لا تصح إلا عندما يكون انبعاث الغازات من المدخنة لفترة محدودة وهو أمر غير عملي وقد تم تعديل علاقة ستن بموديل كاوسيان(Gaussian plume model):

$$C(X,Y)=[Q/(\pi U_H \alpha y \alpha x)]\exp[-H^2/2\alpha^2 z]\ \exp[-y^2/2\alpha^2 y]$$

C(X,Y)=concentration at ground level at the point (X,Y) ,µg/m^3

X= distance directly downwind ,m

Y=horizontal distance from the plume centerline, m

Q=emission rate of pollutants, µg/s

H= effective stack height ,m (H=h+▲h),

Where:

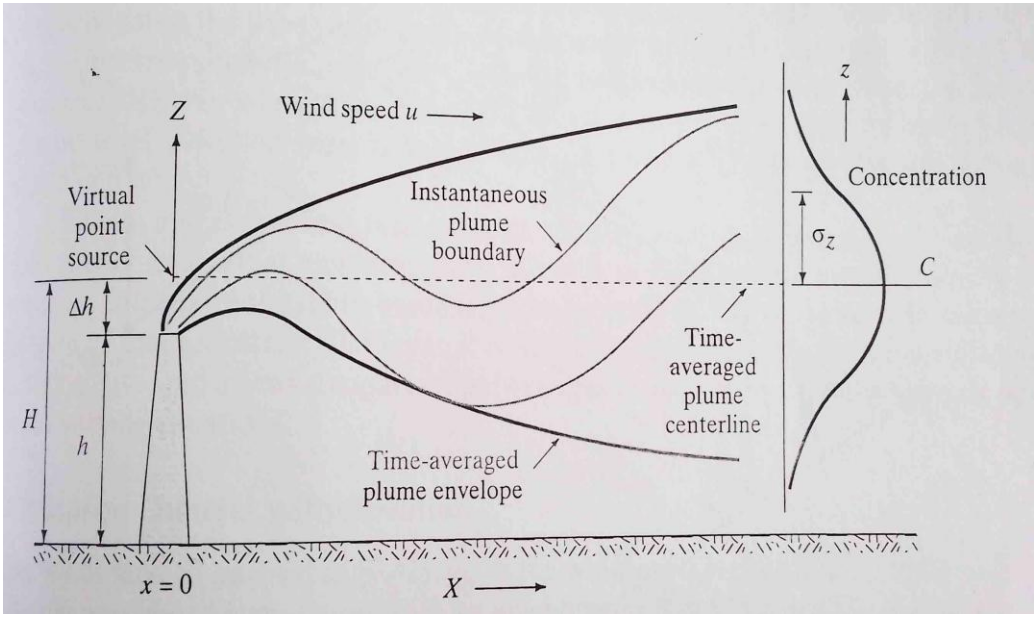
h= actual stack height and ▲**h**=plume rise.

U_H= average wind speed at the effective height of the stack ,m/s

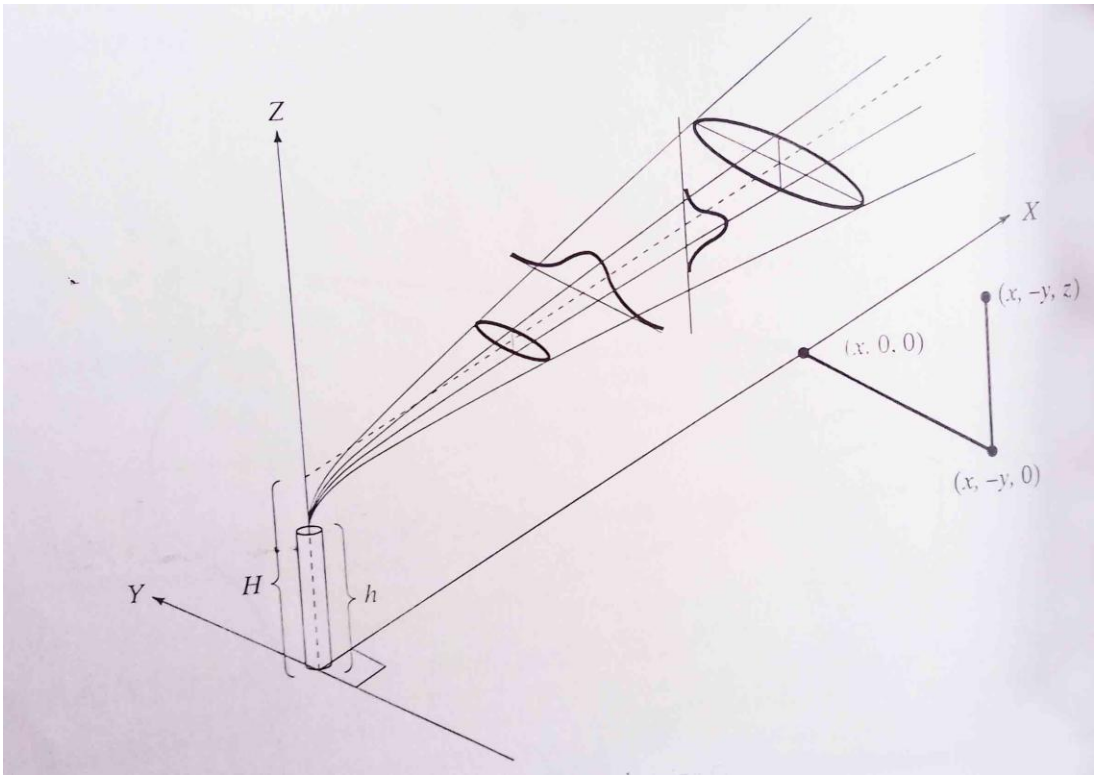
ay=horizontal dispersion coefficient (standard deviation),m

αx= vertical dispersion coefficient (standard deviation),m

شكل يبين المخطط المعتمد في موديل كاوسيان



شكل يبين التوزيع الطبيعي لانتشار الغمامة بالاتجاهين والمعتمدة في معادلة كاوسيان



موديل كاوسيان اعتمد على الاعتبارات التالية :

1) إن معدل انبعاث من المصدر هو ثابت .
2) إن سرعة الريح ثابتة مع الزمن ومع الارتفاع .
3) إن الملوثات مقاومة، أي لا تتحلل ولا تتفاعل ولا تترسب وإذا وصلت إلى الأرض فإنها لا تمتص بل تنعكس كلها .
4) إن الأرض نسبيا مبسوطة ومنطقة مفتوحة أي بدون عوارض .

إن قيم معاملات الانتشار تؤخذ من جداول خاصة تم وضعها بعد دراسات حقلية وفي حالات استقرار جوية مختلفة. ويمكن إيجاد كل من قيم معامل الانتشار العمودي والأفقي بالمعادلات التالية:

$$\alpha_y = a\,X^{0.894} \quad , \quad \alpha_z = c\,X^{d} + f$$

: حيث إن X يعبر عنها بالكيلومتر وان كل من α_y, α_z سوف تخرج قيمها بالأمتار

ويمكن إيجاد كل من قيم a ,b ,d and f من الجداول التالية:

Values of the constants a, c ,d, and f for use in calculating α_y and α_z							
	X<=1 km				X>=1km		
Stability	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
B	156	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2
C	104	61	0.911	0	61	0.911	0
D	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13
E	50.5	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-34
F	34	14.35	0.740	-0.35	62.6	0.18	-48.6

Dispersion coefficients (m)												
	α_y						α_z					
X (km)	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
0.2	51	37	25	16	12	8	29	20	14	9	6	4
0.4	94	69	46	30	22	15	84	40	26	15	11	7
0.6	135	99	66	43	32	22	173	63	38	21	15	9
0.8	174	128	85	56	41	28	295	86	50	27	18	12
1	213	156	104	68	50	34	450	110	61	31	22	14
2	396	290	193	126	94	63	1953	234	115	51	34	22
4	736	539	359	235	174	117		498	216	78	51	32
8	1367	1001	667	436	324	218		1063	406	117	70	42
16	2540	1860	1240	811	602	405		2274	763	173	95	55
20	3101	2271	1514	990	735	495		2904	934	196	104	59

تركيز الملوث الغازي عند النقطة التي يهبط فيها بالمستوى الأرضي
Downwind ground level Concentration

إن أعظم تركيز الملوث بالمستوى الأرضي بعد هبوطه مباشرة سوف يكون عندما y=0

$$C(X,Y)=[Q/(\pi U_H \alpha y \alpha x)] \exp[-H^2/2\alpha^2 z] \exp[-y^2/2\alpha^2 y]$$

For Y=0, So., C(X,0) becomes as follows:

$$C(X,0)=[Q/(\pi U_H \alpha y \alpha x)] \exp[-H^2/2\alpha^2 z]$$

$$C(X,Y)=\left[\frac{Q}{\pi * UH * \alpha y * \alpha x}\right] exp\left[\frac{-H2}{2\alpha 2z}\right]$$

مثال : معدل انبعاث غازثاني اوكسيد الكبريت من محطة كهربائية $(6.47*10^8)$ µg SO_2/s الارتفاع المؤثر للمدخنة 300 م . تم وضع مقياس سرعة الريح على ارتفاع 10 م وكانت 2.5 م/ثانية اليوم كان صيفي وغائم ،

1- ما هو التركيز الأرضي للغاز على بعد 4 كم مباشرة أسفل الرياح إذا كان الجو غير مستقر بشكل قليل (slightly unstable) أي أن قيمة معامل التشتت الافقي والعمودي هو αy =359 م ، αx=216 م ؟ ملاحظة : تؤخذ قيمة الاس ρ=0.2

2- اذا كان المعدل السنوي المسموح به لانبعاث غاز ثاني اوكسيد الكبريت هو 80 مايكروغرام/ متر مكعب والمعدل اليومي لانبعاث هذا الغاز 365 مايكروغرام/ متر مكعب ، فهل ان انبعاث هذا الغاز من المعمل هي ضمن المحددات المسموحة بها وبماذا توصي ؟

Solution :

$$(U_H/Ua)=(H/Za)^{\beta} \quad , \quad U_H= Ua\,(H/Za)^{\beta}$$

$$U_H = 2.5(300/10)^{0.2} = 4.9 \text{ m/s}$$

$$C(X,0)=[Q/(\pi U_H \alpha y \alpha x)] \exp[-H^2/2\alpha^2 z]$$

$$C(4,0)=[(6.47\mu g/s/\pi * 4.9m/s * 359m * 216)] \exp[-300)^2/(2*(216)^2]$$

$$=206\ \mu g/m^3$$

نستنتج من هذا المثال أن هذه المحطة سوف تضيف 206 مايكروغرام/متر مكعب من غاز ثاني اوكسيد الكبريت وهي اكبر بكثير من (80 مايكروغرام/ متر مكعب) هو المعدل السنوي المسموح به .

وإذا قارنها مع الناتج اليومي المسموح به لهذا الغاز (365 مايكروغرام/متر مكعب) نجد أنها اقل ولكن قد تتعدى المواصفات في حالة كانت الظروف اليومية لها مختلفة

التوصية : يجب تحذير هذا المعمل لان معدل الانبعاث له مقاربة من المعدل اليومي في ظروف كهذه ويمكن ان تزيد في حالة تبدل الظروف ؟

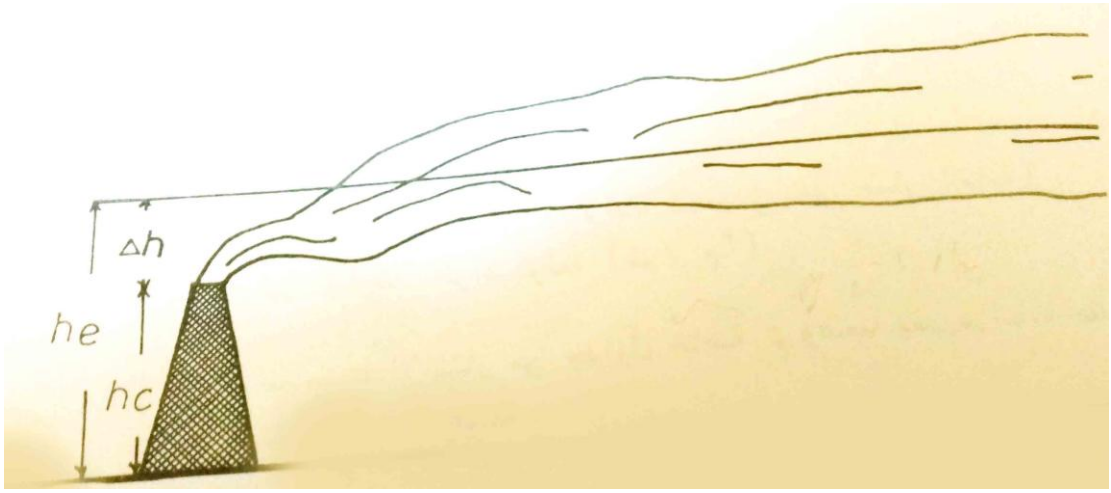
البدائل المقترحة للتخفيف من التركيز الخارج من المدخنة :

1- استعمال فحم فيه محتوى كبريتي قليل للتقليل من انبعاث غاز ثاني اوكسيد الكبريت
2- استعمال مرشحات هواء وتفضل أن تستعمل المرسبات الرطبة في هذه الحالة
3- استعمال مدخنة ذات ارتفاع أعلى للتقليل من تركيز هذا الغاز على هذا البعد

واجب بيتي : اعد حل السؤال بعد زيادة ارتفاع المدخنة الى 300 م ؟

صعود الغمامة (▲h) (plume Rise)

حال مغادرة الغمامة المدخنة تمتزج مع الهواء ثم تنحرف باتجاه الريح السائدة ولكن لسرعة خروج الغازات ولقلة كثافتها بسبب سخونتها فإنها سوف تستمر بالصعود نسبة للهواء المجاور ويزيد مقدار صعود الغمامة مع ارتفاع مصدر الانبعاث وذلك بسبب نقصان الاضطرابات الهوائية مع الارتفاع ، ونظر لأهمية مثل هذا الارتفاع في تحديد تراكيز الملوثات على مستوى سطح الأرض المجاورة فقد كثرت المعادلات الرياضية التي تسعى إلى توقعه وقد ثبت أن ارتفاع الغمامة يستمر حتى بعد أن تبتعد عن المدخنة باتجاه الريح السائدة والأكثر من 1000 م وفي معظم الحالات لا يتأثر مقدار هذا الارتفاع باستقرارية الجو .



وفي حالة الظروف الثابتة (stable conditions) فان صعود أو ارتفاع الغمامة يحسب من المعادلة التالية التي اقترحها العالم براجس Briggs ,1972:

$$\blacktriangle h = 2.6[F/(U_h * S)]^{1/3}$$

$$F = g * r^2 * v_s[1-(T_a/T_s)]$$

$$S = (g/T_a)[(\blacktriangle T_a/\blacktriangle z)+0.01\ ^0C/m)$$

▲**h**=plume rise, (m)
g=gravitational acceleration, 9.8 m/s^2
r=inside radius of the stack, m
$\mathbf{U_h}$= wind speed at the height of the stack, m/s
$\mathbf{v_s}$ =stack gas exit velocity, m/s

T_s= stack gas temperature, Kelvin

T_a =ambient temperature, Kelvin

S =stability parameter, S^{-2}

وفي حالة الظروف الغير النابتة (unstable conditions) فان صعود أو ارتفاع الغمامة يحسب من المعادلة التالية التي اقترحها العالم براجس Briggs ,1972:

$\blacktriangle h=[(1.6*F^{1/3}*X_f^{2/3}) / U_h]$

X_f = distance downwind to point of final plume rise ,m

Use $X_f = 120\ F^{0.4}$ if F> or = 55 m^4/S^3

$X_f = 50\ F^{5/8}$ if F< 55 m^4/S^3

Example about Plume Rise :

A large power plant has a 250 m stack with inside radius 2m,The exit velocity of the stack gases is estimated at 15 m/s at a temperature of 140 ^0C (413 K) . Ambient temperature is 25 ^0C (298 K) and winds at stack height are estimated to be 5 m/s .

Estimate the effective height of the stack if ;

A) The temperature is stable with temperature increasing at the rate of 2 $^0C/km$.

B) *The atmosphere is slightly unstable .*

Solution ;

$F=g*r^2*v_s[1-(T_a/T_s)]$

$=9.8*2*15*[1-(298/413)]=164\ m^4/s^3$

A) **$S=(g/T_a)[(\blacktriangle T_a/\blacktriangle z)+0.01\ ^0C/m)$**

$=(9.8/298)*(0.002+0.01)=0.0004\ /s^2$

$\blacktriangle h=[(1.6*F^{1/3}*X_f^{2/3}) / U_h]$

$=2.6[164/(5*0.0004)]=113$ m

So, the effective height of the stack ,H=h+▲h, H=250+113=363 m

B) **$X_f = 120\ F^{0.4}$** , $=120*(164)^{0.4}=923$ m

$\blacktriangle h=[(1.6*F^{1/3}*X_f^{2/3}) / U_h]$

$=[(1.6*(164)^{1/3}*(923)^{2/3}) / 5]=166$ m

So, the effective height of the stack , H=250+166=413 m

حساب المسافة التي يصبح فيها التركيز أعظم ما يمكن (Xmax)

من الناحية العملية فان قيمة **(C)** ليست هي المهمة بل إن المهم في الغالب هو حساب أعلى تركيز محتمل من مصدر انبعاث معلوم وتحت ظروف جوية محددة **C max**.

وجد العالم (turner,1970) المعادلة التالية لحساب المسافة التي يصبح فيها أعظم تركيز :

$$C_{max}=(Q/U_H)(C^*U_H/Q)_{max}$$

مثال : إذا توفرت نفس ظروف المثال السابق، أوجد المسافة التي تبعد عن المدخنة يكون فيها تركيز الملوث الغازي أعظم ما يمكن ؟

$$C_{max}=(Q/U_H)\ (C^*U_H/Q)_{max}$$

$1.5*10^{-6}=(C^*U_H/Q)_{max}$ ---------- from table

$C_{max}=[(6.47*10^8)/4.9]*1.5*10^{-6}=198\ \mu g/m^3$

نلاحظ إن هذا الرقم قريب من المثال السابق عند مسافة 4 كم .

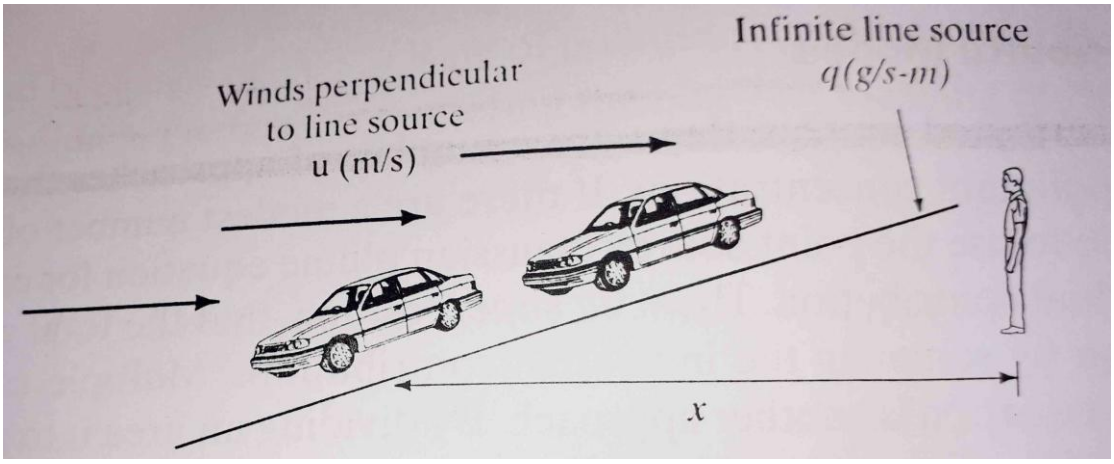
الملوثات الغازية القادمة من المصادر النقطية المتعددة (الخطية)

يمكن حل مسائل التلوث للملوثات الغازية القادمة من المصادر النقطية المتعددة (الخطية) مثل السيارات أو وجود سلسلة من المعامل على ضفة نهر حيث يمكن إيجاد تركيز المستوى الأرضي للملوثات على بعد X من مصدر التلوث الخطي باستعمال المعادلة التالية:

$$C(X)= (2q)/[\sqrt{2\pi}\alpha z\mu\ ]$$

q= emission rate per unit of distance along the line (g/m.s)

شكل يبين مقطع طولي للملوثات الخطية في الطرق الخارجية وبعد المسافة X عن المصدر



مثال : إذا كانت القوانين المسموحة بانبعاث لغاز أول اوكسيد الكاربون قرب الطرق الخارجية 10 ملغم/ م^3 وافترض أن الطريق تمر فيه 10 عجلات /ثانية وكل عجلة تطرح 3.4غم /ميل من غاز أول اوكسيد الكاربون. فإذا كانت الريح عمودية على الطريق الخارجي وبسرعة 5 ميل /ساعة (2.2) م/ ثا وعلى مدار يوم ملبد بالغيوم. احسب تركيز غاز أول اوكسيد الكاربون على بعد 100 م من هذا الطريق ؟

الحل : يجب أولا إيجاد انبعاث هذا الغاز لكل متر طول من الطريق وكما يلي :

$q=(10)\ vehicle/s*(3.4\ )g/vehicle.\ mile*1mile/1609m=0.02g/s.\ m$

يجب ثانيا إيجاد معامل التشتت العمودي من المعالة التالية :

$$\alpha_z = c\ X^d + f$$

نلاحظ من الجدول أن قيمة $f=-1.7$ ، $d=0.725$ for $X\leq 1$ km ، $C=33.2$

$=33.2\ (0.1)^{0.725}-1.7=4.6$ m

أخيرا نقوم بتطبيق المعادلة السابقة :

$$C(X)= (2q)/[\sqrt{2\pi}\alpha z\mu\ ]$$

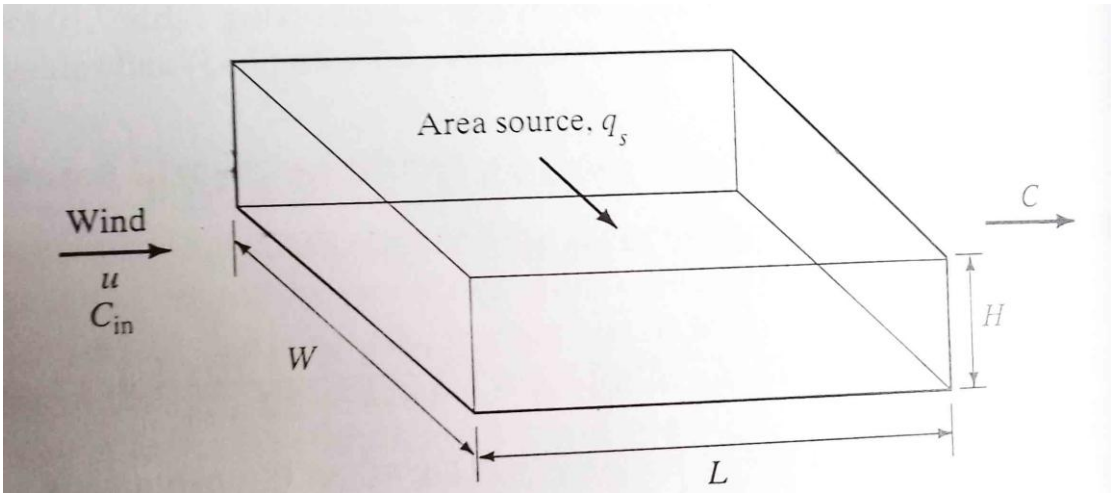
$C(0.1km)=2*0.021*10^3/[(2\pi)^{1/2}*4.6\ *2.2]=1.7\ mg/m^3$

ولو قارنا التركيز الناتج مع المواصفات العالمية المسموحة لتركيز هذا الغاز $(10mg/m^3)$ نجد انه اقل بكثير من الحدود المسموحة.

موديل للتلوث المساحي

Area- Source Models

لإيجاد التلوث الهوائي الحاصل فوق مدينة معينة نستعمل الموديل الصندوقي (box model) حيث نفترض أن الهواء يعبر في منطقة على شكل صندوق أبعاده كما مؤشرة أدناه في الشكل (L,W and H) ونفترض أن سرعة الرياح كانت (u) وعمودية على جهة من الصندوق . إن ارتفاع الصندوق سوف يتحدد من الظروف الجوية حيث نأخذ فقط المنطقة التي يحصل فيها مزج هوائي. أن معدل انبعاث الملوثات لكل وحدة مساحة سوف يمثل بالرمز (q_s) ووحدته هي (g/m^2S).نفترض أن الهواء الذي يضرب المدينة من إحدى جهات الصندوق يحمل معه ملوثات تركيزها (Ci) ونفترض كذلك للتبسيط انه لا يوجد أي فقدان للملوثات أثناء عبور الهواء للمدينة لغاية الخروج منها ونفترض كذلك إن الملوثات داخل المدينة يحصل فيها مزج تام (Completely mixed) وأن التركيز الخارج المتجانس نطلق عليه (C) .أخيرا نفترض أن الملوثات مقاومة (Conservative) أي بمعنى أنها لا تتفاعل ولا تذوب أو تسقط من المجرى الهوائي .



ولعمل توازن للكتلة (mass balance) داخل الصندوق فيمكن القول ان كمية الملوثات داخل الصندوق هو عبارة عن حجم الصندوق مضروب في التركيز (LWHC). وان معدل الهواء الداخل للصندوق أو الخارج منه هو مساحة المقطع العمودي المواجه للصندوق مضروبا سرعة الريح القادمة (WHu) .كذلك أن معدل كمية الملوثات الغازية الداخلة للصندوق (WHuCin) وان معدل الغازات المغادرة للصندوق هي (WHuC) وبذلك يمكن كتابة معادلة توازن الكتلة كما يلي :

(Rate of change of pollution in the box)=
(Rate of pollution entering the box) – (Rate of pollution leaving the box)
LWH dC/dt = qsLW+ WHuCin- WHuC

C=pollutant concentration in the air shed ,mg/m^3

C in= concentration in the incoming air, mg/m^3

H=mixing height, m

L=length of air shed, m

W=width of air shed, m

U= average wind speed against one edge of the box, m/s

For steady state condition . dc/dt=0, so that

$WHuC = q_sLW + WHuC_{in}$

$HuC = q_sL + HuC_{in}$

$C_\infty = (q_sL/Hu) + C_{in}$

إذا كان الهواء الداخل نظيف فان تركيز الحالة الثابتة سوف يتناسب طرديا مع معدل الانبعاث وعكسيا مع معامل التهوية (Ventilation coefficient) والذي ينتج من حاصل ضرب ارتفاع منطقة المزج في سرعة الريح . وإذا اعتبرنا أن التركيز الابتدائي C=0 عند الزمن T=0 فيمكن حل المعادلة كالأتي :

$C(t) = (q_sL / Hu + Cin) [1-exp(-ut/L)] + C(0)e^{-ut/L}$

وإذا افترضنا أن الريح القادمة ليس فيها أي ملوثات وإذا افترضنا أن التركيز الأولي للملوثات داخل الصندوق =0 فيمكن تبسيط المعادلة السابقة إلى ما يلي :

$C(t)= (q_sL/Hu)[1-exp(-ut/L)]$

$$C(t)=\frac{q*L}{H*U}\,[1-exp(-U*t/L)]$$

وعندما t=L/u فان exp(-ut/L) سوف تصبح قيمتها e^{-1} وبالتالي فان التركيز سوف يصل إلى 63% من قيمته الأولية . هذه القيمة من الزمن لها عدة أسماء منها ثابت الزمن ، زمن التهوية .

مثال : افترض انه يوجد مدينة مربعة الشكل طول ضلعها 15 كم فيها حوالي 200000 عجلة تسير على الطرق ، كل عجلة تسير مسافة 30 كم لمدة ساعتين عصرا وافترض إن كل عجلة تطرح 3 غم/كم من غاز أول اوكسيد الكاربون في جو شتوي فيه انعكاس إشعاعي تصل مسافة مزج الملوث إلى ارتفاع 20 م وافترض إن الرياح تجلب هواء نقي بسرعة 1 م/ثا على طول حافة المدينة . استعمل الموديل الصندوقي لإيجاد تركيز هذا الغاز بعد نهاية الساعتين على افتراض أن الملوث الوحيد لغاز أول اوكسيد الكاربون قادم من هذه العجلات وعلى افتراض أن هذا الغاز لا يتحلل وله مزج تام مع الهواء .

$q=(200000*30*3)/[(15*10^3)^2*(3600*2)]=1.1*10^{-5}\ g/s.m^2$

$C(t)= (q_sL/Hu)[1-exp(-ut/L)]$

$C(2hr)= (1.1*10^{-5}\ *15*10^3)\ [1- exp(-1*7200/15000)]/\ (20*1)$

$=3.2*10^{-3}\ g/m^3=3.2\ mg/m^3$

إذا كانت المحددات لانبعاث غاز أول اوكسيد الكاربون هي 40 ملغم/م^3 لمدة ساعة أو 10 ملغم /م^3 لمدة 8 ساعات فان الناتج هو اقل من المحددات .

تمارين عامة

س/1 وضع مقياس سرعة الهواء على ارتفاع 10 م وسجل سرعته فكانت 4 م/ثا . ما هو معامل التنفيس عند الارتفاع الفعال للمدخنة البالغ 250 م ؟ اذا كانت قيمة (ρ) = 0.2 ؟

Solution:

$(U_H/Ua)=(H/Za)^{\beta}$

$(U_{250}/4)=(250/10)^{0.2}$

U_{250} =7.6 m/sec

Ventilation coefficient=250*7.6=1900 m^2/sec

س/2 افترض إن مدخنة تنفث غاز أول اوكسيد الكاربون بمعدل 20 غم/ثا في يوم صاف فيه سرعة الريح عند الارتفاع الفعال للمدخنة 2 م/ثا وكان الارتفاع الفعال للمدخنة 6 م، ما هو التركيز الأرضي للغاز على بعد 400 م ؟علما إن اليوم الصاف معامل الانتشار العمودي له 7 م ومعامل الانتشار الأفقي 15 م ؟

Solution:

$C(X,0)=[Q/(\pi U_H \alpha y \alpha z)] \exp[-H^2/2\alpha^2 z]$

For X=400m, αy=15m, αz=7m

$C(400,0)=[(20*10^6(\mu g/s)/\pi*2(m/s)*15m*7m)]\exp[-(6)^2/2*(7)^2]$

$=21*10^3\ \mu g/m^3 =21\ mg/m^3$

س/3 افترض انه لدينا المعدل التالي يبين درجات حرارة الجو مع الارتفاع

Altitude (m)	Temperature (^{0}C)
0	20
100	18
200	16
300	15
400	16
500	17
600	18

1- ما هو الارتفاع الذي يحدث فيه منطقة المزج؟

2- ما هو الارتفاع الذي تتوقع أن يصله الغمامة من الدخان الصاعد من مدخنة ارتفاعها 100 م وإذا كانت درجة الحرارة في هذا اليوم 21 ^{0}م وكانت الظروف بنفس معدل الهبوط البيئي ؟

3- ماذا تتوقع أن تكون شكل الغمامة (looping, Coning, fanning fumigating)؟

4- هل تتوقع ان يحدث تلوث عال اذا كانت سرعة الريح عند منطقة المزج 10 م/ثا؟

س/4 إذا كانت الدقائق المنبعثة من حرق 685 مليون طن من الفحم في محطة طاقة تنتج (1400 billion kwh) من الكهرباء وافترض أن معدل المحتوى الحراري للفحم (10,000 Btu/lb) :

1- ما هو معدل الكفاءة (الكهرباء المتولدة /الطاقة الحرارية الداخلة)؟

2- كم هي عدد الدقائق التي سوف تنبعث من المحطة إذا كانت تبعث (0.03 lb/10^6 Btu of heat).

1 ton=2000 lb, 1 kw.h=3412 Btu

Solution:

1)Heat Input=685*10^6 tons*2000(lb/tons)*10,000(Btu/lb)

= 1.37*10^{17} Btu

Efficiency= output/In put

Output= 1400*10^9 (Kw.h)*3412 Btu/Kw.h

Efficiency=1400*10^9 *3412/1.37*10^{17} = 0.349=35%

2)Emission=[0.03 lb/10^6 Btu]* (1.37*10^{17} Btu)*(1000 g/2.2 lb)

=1.87*10^{16} g=1.87*10^{10} tons

س/5 محطة كهربائية لها مدخنة ارتفاعها 100 م بنصف قطر للمدخنة 1 م تخرج الغازات بسرعة 10 م/ثا وبدرجة حرارة 120 ^{0}م . درجة حرارة الجو 6 ^{0}م . سرعة الريح في أعلى المدخنة 5 م/ثا سرعة الريح على سطح الأرض 3 م/ثا وهو يوم صيفي غائم اوجد الارتفاع الفعال للمدخنة ؟ علما أن هكذا جو يصنف من الصنف C ولذلك فهو مستقر stable ؟

Solution :

$$F=g*r^2*v_s[1-(T_a/T_s)]$$

=9.8*1^2*10*[1-(6+273)/(120+273)]=28.4 m^4/s^3

F< 50 , Xf=50$F^{(5/8)}$, Xf==50*$(28.4)^{(5/8)}$,Xf=406 m

بما ان الجو من النوع C فهو مستقر Stable

$$\blacktriangle h= [(1.6*F^{1/3}*X_f^{2/3}) / U_h]$$

=[(1.6*$(28.4)^{1/3}$ *$(40)^{2/3}$) / 5]=54 m

So, the effective height of the stack , H=100+54=154 m

س/6 محطة كهربائية تنتج 200 ميكاواط لها مدخنة ارتفاعها 100 م ونصف قطر المدخنة 2.5 م سرعة الغاز المنبعث 13.5 م/ثا ودرجة حرارة الغاز 145 ^{0}م . درجة حرارة الجو 15 ^{0}م ، سرعة الريح عند الارتفاع الفعال المدخنة 5 م/ثا والجو مستقرstable من النوع E ومعدل الهبوط البيئي 5 ^{0}م/كم . المدخنة تنفث 300 غم/ثا من غاز ثاني اوكسيد الكبريت .أوجد التركيز الأرضي للغاز على بعد مسافة 16 كم مباشرة ؟

Solution:

$$F=g*r^2*v_s[1-(T_a/T_s)]$$

$$=9.8*(2.5)^2*(13.5)*[1-(15+273)/(145+273)]=275\ m^4/s^3$$

Since it is Class E , So;

$$S=(g/T_a)[(\blacktriangle T_a/\blacktriangle z)+0.01\ ^0C/m)$$

$$=9.8/(15+273)*(0.005+0.01)=5.1*10^{-4}\ /s^2$$

$$\blacktriangle h = 2.6[F/(U_h*S)]^{1/3}$$

$$\blacktriangle h = 2.6[275/(5*5.1*10^{-4})]^{1/3} =121\ m$$

H= 100+121=221 m

At 16 km ; αy =602 m αz=95 m , $U_H=5\ m^2/sec$

C(X,0)=[Q/(π UH αy αz)] exp[-H2/2α2z]

$$C(X,0)=[300/(\pi *5 *602* 95)]\ exp[-2212/2*952]=22\ \mu g/m^3$$

س/7 تلوث من مصدر خطي ناتج عن حرق مخلفات زراعية تنفث دقائق بتركيز (0.3 g/m.s) في جو من صنف C ، سرعة الريح العمودية على المصدر (3 m/s) ن ما هو التركيز الأرضي للدقائق على بعد 400 م من المصدر ؟علما ان الصنف C يعطي معامل الانتشار العمودي 26 م ؟

solution

Class C , αz =26m

$$C(X)= (2q)/[\sqrt{2\pi}\alpha z\mu\ ]$$

$$C(X)= (2*300)/[\sqrt{2\pi}*3*26\ ]=3\ mg/m^3$$

س/8 طريق سريع تمر فيه 10000 عجلة في الساعة وهنالك بيت يبعد 200 م عن الطريق ، كل عجلة تبعث 1.5 غم لكل ميل من الطريق من غاز NO_X وسرعة الريح العمودية على الطريق 2 م/ثا باتجاه البيت . أوجد تركيز الغاز في البيت في يوم صائف ظهرا مفترضا أن هذا الغاز هو غاز لا يتحلل ؟

Solution

من الجدول بما ان الجو صاف نقترح اما ان يكون من الصنف A او من الصنف B فلذلك نأخذ المعدل

For Class A ; αz=29m and αz=20 m

Take an average αz=26 m

Q= 10,000*(1/3600)*(1.5g/mile. Vehicle)*(mile/5280 ft)*(ft/0.3048m)

$$=2.58*10^{-3}\ g/m.s$$

$$C(X)= (2q)/[\sqrt{2\pi}\alpha z\mu\ ]$$

$$C(X)= (2*2.58)/[\sqrt{2\pi}*2*26\ ]=0.04\ mg/m^3$$

س/9 معمل لإنتاج الورق يبعد 1 كم عن مدينة ويبعث 40 غم/ثا من غاز H2S والذي له حد حرج مقداره 0.1 ملغم/م^3 .سرعة الريح متغيرة في أعلى المدخنة بين 4 إلى 10 م/ثا باتجاه المدينة ، ما هو اقل ارتفاع للمدخنة يجب ان يصمم له لكي يصبح التركيز في المدينة لا يزيد عن عشر الحد الحرج إذا كان الجو من النوع B أي ان αz=110 م وان αy =156 م مفتلرضا ان ▲h= 0 ؟

Solution:

$C=(0.\ 1/10)=0.01\ mg/m^3=0.01*10^{-3}\ g/m^3$

$C(X,0)=[Q/(\pi\ U_H\ \alpha y\ \alpha z)]\ \exp[-H^2/2\alpha^2 z]$

$0.01*10^{-3}=[40/(\pi\ U_H\ *156\ *110)]\ \exp[-H^2/2*(110^2)]$

$\exp[-H^2/2*110^2]=[40/(\pi\ U_H\ *156\ *110)]$

$\exp[-H^2/2*110^2]=74.2/U$

$H=[24{,}000\ \ln(74.2/U)]^{1/2}$

For U=4 m/sec ; H=265 m

For U=10 m/sec ; H=220 m

س/10 مدينة مربعة الشكل طول ضلعها 100,000 م وارتفاع منطقة المزج 1200 م تهب ريح بإحدى جهاتها بسرعة 4 م/ثا . معدل الحمل المنبعث من الغازات داخل المدينة 20 كغم/ثا من غاز SO_2 . احسب تركيز الغاز بعد مرور 9 ساعات داخل المدينة ؟

Solution

$q=20\ kg/s=(20*10^3)/(1*10^5)^2=20*10^3*10^{-7}\ g/m^2.s=20*10^{-4}\ g/m^2.s$

$q=0.002\ g/m^2.s$

$t=9*3600=32400\ sec$

$C(t)=\frac{q*L}{H*U}\ [1-\exp(-U*t/L)]$

$C(t)=\frac{(0.002)*(100{,}000)}{1200*4}[1-\exp(-4*32400)/(100{,}000))]$

$C(t)=\frac{(200)}{4800}[1-\exp(-129600)/(100{,}000)]$

$C(t)=0.0416[1-\exp(-1.296)]$

$C(t)=0.0416\ *[0.726]=0.03\ g/m^3$

س/11 إذا أعدنا السؤال السابق ولكن بافتراض ان t=L/u أي أن سرعة الريح 2 م/ثا وان طول المدينة 14400 م والزمن الذي يتركز فيه الغاز هو 2 ساعة وان معدل العجلات المارة 200000 عجلة كل عجلة تسير مسافة 30 كم كمعدل وان كل عجلة تبعث حوالي 3 غم/ كم من الطريق فما هو التركيز الجديد للغاز في المدينة ؟

Solution;

L=14,400 m , U=2m/s , t=7200 sec

$q=(200{,}000*30*3)/(14{,}400)^2*12*2=1.2*10^{-5}$

$C(t)= (q_sL/Hu)[1-exp(-ut/L)]$

$C(t)= (1.2*10^{-5})*(14,400) /(2*20)[1-exp(-(2*7200)/(14,400)]$

$=[(43.2*10^{-5} *0.632 =2.732*10^{-5}$

الاستنتاج : نلاحظ ان التعبير الرياضي $[1-exp(-ut/L)]$ =0.632 اي ان التركيز الجديد =63% من التركيز الكلي وان هذا الزمن يطلق عليه مايلي

Time constant, ventilation time , Residence time , E-folding time

س/12 مدخنة ارتفاعها 250 م وقطرها 4 م سرعة الهواء المنبعث منها 15 م/ثا بدرجة حرارة 413 كلفن ودرجة حرارة الجو 298 كلفن وسرعة الريح 5 م/ثا . أوجد :

1- الارتفاع المؤثر للمدخنة في حالة كون الظروف مستقرة بزيادة درجة حرارة 2 ^{0}م /كم ؟

2- الارتفاع المؤثر للمدخنة في حالة كون الظروف غير مستقرة ؟

Solution:

$F=g*r^2*v_s[1-(T_a/T_s)]$

$=9.8*(2)^2*(15)*[1-(298)/(413)]=275\ m^4/s^3$

A)For stable conditions;

$S =(g/ T_a)[(\blacktriangle T_a/\blacktriangle z)+0.01\ ^0C/m)$

$=9.81/(298)*(0.002+0.01)=0.004\ /s^2$

$\blacktriangle h = 2.6[F/(U_h*S)]^{1/3}$

$\blacktriangle h = 2.6[164/(5*0.004)]^{1/3} =113$ m

H= 113+250=363 m

B)For unstable conditions

Use $X_f =120\ F^{0.4}$ if F> or = 55 m^4/S^3

$=120(164)^{0.4} =923$ m

$\blacktriangle h=[(1.6*F^{1/3} *X_f^{2/3}) / U_h]$

$=[(1.6*164^{1/3} *923^{2/3}) / 5]=166$m

H= 166+250=413 m