الفصل الثالث

دلائل الموجة Waveguides

مقدمة:–

تم في الفصـــل الثاني تقديم فكرة عن ربط المرســل بالمســتقبل عبر اســتخدام خط نقل مكون من موصـــــل أو أكثر وتم التركيز على اســـتخدام خط نقل من موصــــلين وتقديم التحليلات التفصــــيلية اللازمة لمعالجة هذا النوع من الخطوط. لقد لوحظ انه عند الترددات الأعلى من (3 GHz) يصبح من الصعب نقل الموجات الكهرومغناطيسية باستخدام خطوط النقل والكوابل . من الممكن في هذه الحالة نقل الموجات بواســطة انبوبة معدنية تســمى دليل الموجة. سيتم في هذا الفصل تقديم خط نقل مكون من **موصل واحد**، موصل مفرغ يمثل **دليل موجة** (waveguide) **وحبل** مكون من مادة شــفافة للضــوء مثل الزجاج أو البلاســتيك هي الألياف البصـــرية (optical fibers) ويعمل كدليل موجة. يوفر خط النقل المكون من موصـــلين وضـــعاً مناســباً لتشــكل أو وجود أو تكّون خطوط المجال الكهربائي (**E**) بين هذين الموصــلين وبشــكل **متعامد** عليهما وتكّون مجالاً مغناطيسـياً (**H**) يلتف حول الموصــل الـداخلي (في حـالـة الكـابـل المحوري) الـذي ينتج فيـه تيـار يتم من خلالـه تـدعيم وجود المجـال المغنـاطيســـي. وهـذه الحـالـة من المجـالات الكهرومغنـاطيســـيـة المتعـامـدة على بعضـــها وعلى اتجاه انتشـــار الموجة (اتجاه الخط الواصـــل بين المرســل والمســتقبل) تدعى بموجة **تعامدية المجال الكهربائي والمغناطيســـي TEM**. من معادلات ماكســـويل يمكن للمجال المغناطيسي أن يوجد داخل هذا الموصل المفرغ في غياب الموصل الداخلي حيث يتم تدعيم التفاف المجالات المغناطيسـية من قبل **تيار التوصـيل** ($J_{cond} = \sigma E$) أو **تيار الحمل**

(J_{conv}) أو **تيار الإزاحة** (J_{dis}) أو كل هذه التيارات مجتمعة. وإذا أهمل تيار الحمل لعدم توقع حدوثه هنا وغياب تيار التوصيل وذلك لغياب الموصل الداخلي فإن **تيار الإزاحة** هو **التيار المتبقي الوحيد** الذي يمكن أن يدعم وجود المجال المغناطيسي. وبالتالي فإن معادلات ماكسويل في الفراغ الذي يحيط به موصل تصبح مصادر ومجالات متناغمة مع الزمن كما يلي:–

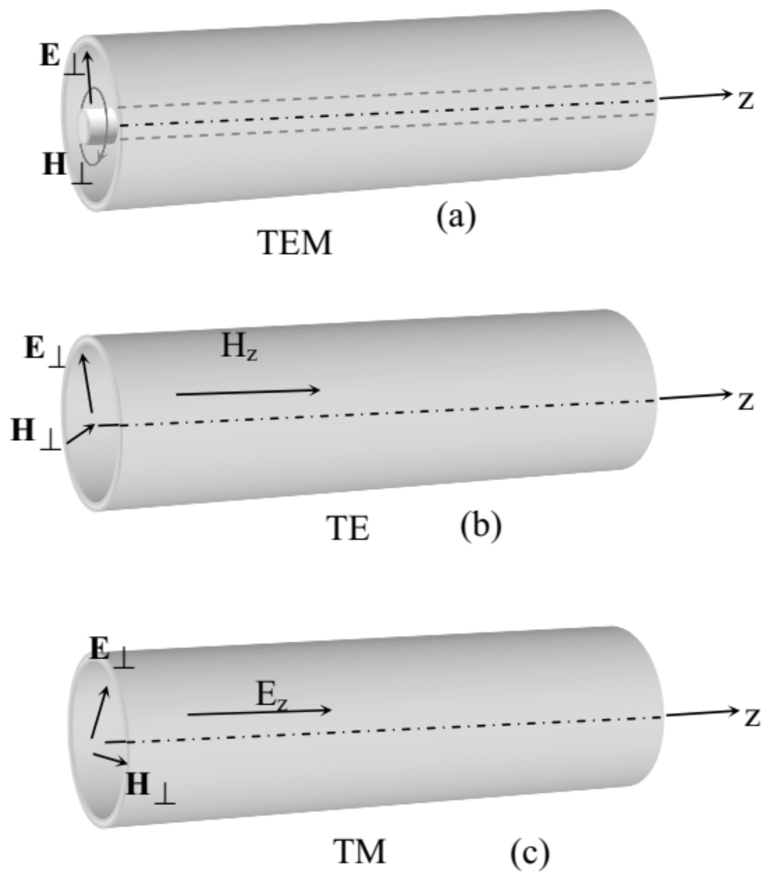
$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega\mu\,\mathbf{H}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega\varepsilon\,\mathbf{E} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (1-4)$$

أو أن **الجزء الالتفافي** من المجال الكهربائي ينشأ عن **مجال مغناطيسي متغير** أما الجزء **غير الالتفافي** منه فينشأ **بين موصلين أو جزأين متباعدين** من نفس الموصل، وأن المجال المغناطيسي (والذي يكون التفافياً) ينشأ عن وجود مجال كهربائي. وبالتالي فإن الموجة الكهرومغناطيسية التي تنشأ في **دلائل الموجة** تختلف عن تلك التي درست في **خطوط النقل** المكونة من موصلين. تكون الموجة في **خطوط النقل**، مثل الكابل المحوري، تعامدية لكلا المجال الكهربائي والمغناطيسي TEM حيث ينشأ المجال الكهربائي بين الموصلين ويلتف المجال المغناطيسي حول الموصل الداخلي. أما في حالة **دلائل الموجة** وفي غياب الموصل **الداخلي** فإن المجال الكهربائي **أو/ و** المجال المغناطيسي، الذي يكون باتجاه الخط الذي يصل المرسل بالمستقبل، يعمل **كبديل لهذا الموصل**. في ضوء ذلك تكون الموجات الناتجة في **دلائل الموجة** موجات تعامدية المجال **الكهربائي** TE أو موجات تعامدية المجال **المغناطيسي** TM أو **كليهما**. ويبين الشكل (1–4) المجالات الكهرومغناطيسية لهذه الموجات في حالة الكابل المحوري ودلائل الموجة حيث تم اعتماد المحور **z** (كخط مرجعي) ممثلاً للموصل الداخلي للكابل المحوري أو ممثلاً للخط الواصل بين المرسل والمستقبل لدلائل الموجة. تم استخدام $\mathbf{E}_\perp$ و $\mathbf{H}_\perp$ لتمثلان المجالات الكهرومغناطيسية

في المســتوى العمودي على **z** واســتخدمت $\mathbf{E_z}$ و $\mathbf{H_z}$ للمجالات الكهرومغناطيســية في اتجاه z.ســـيلعب المجالين $\mathbf{E_z}$ و $\mathbf{H_z}$ دوراً أســـاســـياً في إيجاد المجالات الكهرومغناطيســـية الأخرى($\mathbf{E_\perp}$ و $\mathbf{H_\perp}$) في دلائل الموجة.

سيتم في هذا الفصل بحث دلائل الموجة ذات **المقطع المستطيل** و**المقطع الدائري** إضافة إلى العناصر المختلفة التي تستخدم مع هذه الدلائل (وخاصة ذات المقطع المستطيل) مثل الموائم والفجوات الرنانة والشقوق ... ألخ.



الشكل (4-1):- الموجات المختلفة والمجالات الكهرومغناطيسية الخاصة بها

(a) موجة تعامدية المجالين الكهربائي والمغناطيسي TEM ($Ez = 0$، $Hz = 0$)

(b) موجة تعامدية المجال الكهربائي TE ($Ez = 0$، $Hz \neq 0$)

(c) موجة تعامدية المجال المغناطيسي TM ($Ez \neq 0$، $Hz = 0$)

تطبيقات دليل الموجة:–

- خلال المدى الترددي من 3GHz إلى 100GHz يفضل استخدام أدلة الموجة عن استخدام الخطوط المحورية .
- مظهر دليل الموجة (الدائري) يبدو مشابه للخط المحوري ما عادا أنه لا يحتوي على موصل داخلي

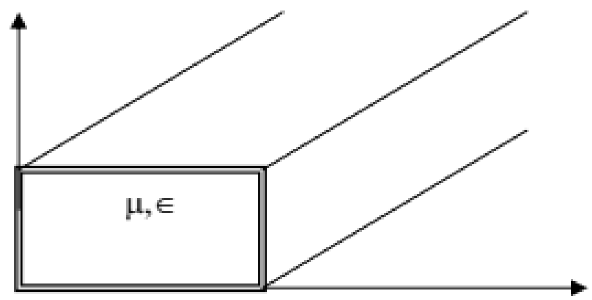
مزايا دليل الموجة:–

(١) تصنيع أدلة الموجة يكون أبسط من تصنيع الخطوط المحورية .
(٢) احتمال حدوث القفز الوميضي يكون قليلاً إذ إن مقدرة دليل الموجة أحسن وتبلغ عشرة أضعاف مقدرة الخط المحوري .
(٣) الفقد في القدرة يكون أقل إذا قورن بالفقد في خطوط النقل .
(٤) دليل الموجة يتميز بالبساطة الميكانيكية وأقصى تردد تشغيل (325 GHz)

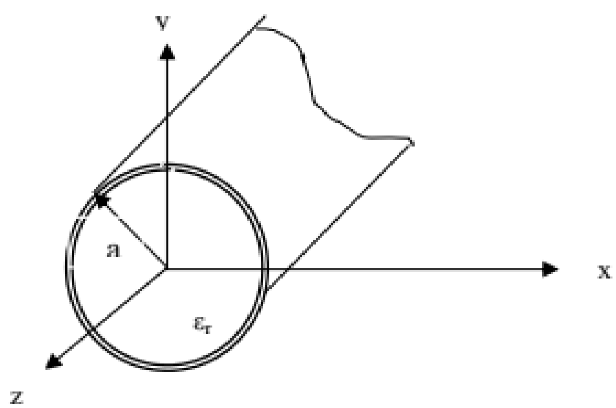
يعتبر دليل الموجة أنبوباً معدنياً (Tube) ذو جودة عالية فارغ من داخله أو معبىء بعازل

أنواع دليل الموجة:-

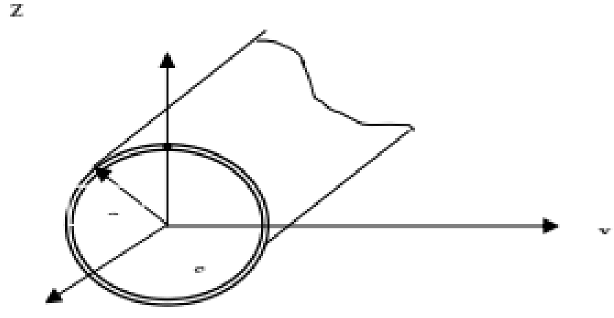
١ - دليل موجة مستطيلي : .



٢ - دليل موجة دائري :



٣ - دليل موجة بيضاوي :



بصورة عامة للتعمق في دراسة دليل الموجة وكيفية حل معادلتة سنفرض لدينا دليل موجة يمتد الى المالانهاية باتجاه المحور (Z) وله مقطع عشوائي لكنه ثابت وواقع في المستوي (XY).

اذا كانت (ψ) تمثل أي مركبة للمجالين الكهربائي والمغناطيســي فانها يجب ان تحقق المعادلة الاتية:-

$$\Delta^2\psi - \frac{1}{V^2}\frac{d^2\psi}{dz^2}=0$$

حيث ان (V) تمثل سرعة الموجة في الوسط.

$$V = {}^{1}\!/_{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

ان حل معادلة الموجة يعطينا

$$\psi(x,y,z,t) = \psi_0(x,y)e^{i(k_g z - wt)}$$

(k_g) كميه ثابته تحدد ثابت الانتشار عند الأوساط حيث ان:-

$$k_g = {}^{2\pi}\!/_{\lambda_g}$$
$$k_0 = {}^{2\pi}\!/_{\lambda}$$
$$k_c = {}^{2\pi}\!/_{\lambda_c}$$
$$k_c{}^2 = k_0{}^2 - k_g{}^2$$

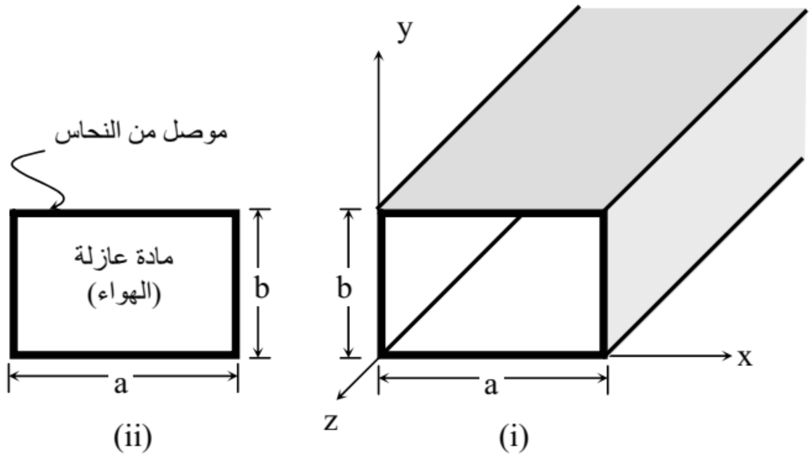
هناك احتمالان للانتشار هما:-

1- $k_0 > k_c$ هذا يعني ان $k_g{}^2 > 0$ وهي كمية حقيقية .

2- $k_0 < k_c$ هذا يعني ان $k_g{}^2 < 0$ وهي كمية خيالية .

دليل الموجة المستطيل (rectangular waveguide):-

سنناقش في هذا البند انتشار الموجات الكهرومغناطيسية المستوية في داخل دليل موجة مستطيل المقطع وهو من الاشكال الشائعة الاستعمال ذلك لسهولة تحليل الموجات النتشرة خلاله. يتكون دليل الموجة من موصل من مادة النحاس أو الألومنيوم مفرغ، ذو مقطع مستطيل يكون **عرضه** مساوياً **(a) وارتفاعه** مساوياً **(b)** ويتم تحديد قيم a و b اعتماداً على **التردد** واعتبارات أخرى سيتم بيانها في حينه. يبلغ **سمك** الموصل المكون للدليل بضعة **مليمترات** يتم تحديدها من الاعتبارات الميكانيكية. ويستخدم الهواء عادة داخل هذا لموصل (الدليل) لذلك نستخدم المقدارين (ϵ_0, μ_0) إلا أنه يتم استخدام مواد عازلة أخرى لأغراض محددة. يبين الشكل (4–2) رسماً توضيحيا لهذا الدليل مبيناً عليه الإحداثيات الكارتيزية حيث تم اعتماد محور **z** ليكون باتجاه محور الدليل (اتجاه الخط الذي يصل المرسل بالمستقبل). عندما يستخدم هذا الدليل لنقل الطاقة الكهرومغناطيسية (في داخله) من المرسل إلى المستقبل فإن موجة كهرومغناطيسية تتكون وتنتشر داخله. ويحكم هذه الموجة ومجالاتها الكهرومغناطيسية معادلات ماكسويل ومعادلة الموجة والشروط الحدودية.



الشكل (2-4):- دليل الموجة المستطيل المكون من موصل مفرغ (b × a)
(i) الدليل والإحداثيات الكارتيرية
(ii) مقطع من الدليل أو منظر أمامي له

سيتم افتراض أن المصدر وبالتالي المجالات الكهرومغناطيسية تتغير مع الزمن بشكل متناغم ($e^{j\omega t}$) أن الموجة تنتشر باتجاه (**z ±**) وتتغير بالتالي تبعاً للدالة ($e^{\pm j\beta z}$) حيث إن **β** هو ثابت انتشار الموجة داخل الدليل والذي سيتم تحديده لاحقاً (تمثل الإشارة **السالبة** في هذه الدالة موجة تنتشر باتجاه **z+** وأما الإشارة **الموجبة** فإنها تمثل موجة تنتشر باتجاه **z-**). في ضوء ذلك يمكن آتابة المجالات الكهرومغناطيسية لهذا الدليل كما يلي) تم اعتبار الإشارة **السالبة** هنا:–

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix}(x,y,z,t) = \begin{pmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix}(x,y)\, e^{j(\omega t-\beta z)} \qquad \text{............. (2–4)}$$

لايجاد شكل المجال الكهرومغناطيسي داخل الدليل سوف نستخدم معادلات ماكسويل بتطبيق الشروط الحدودية على جدران الدليل

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = j\,\omega\epsilon\,\mathbf{E} \qquad \text{............ (3–4)}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\,j\,\omega\mu\,\mathbf{H} \qquad \text{............ (4–4)}$$

مع ملاحظة أن $(\frac{\partial}{\partial z} \rightarrow -j\beta)$

وبفرض عدم وجود شـــحنات او تيارات طليقة داخل دليل الموجة اي ان (J_c) فاننا من معادلة (3) نحصل على :–

$$\frac{\partial H_z}{\partial y} + j\beta\ H_y = j\omega\varepsilon\ E_x$$
$$-\frac{\partial H_z}{\partial x} - j\beta\ H_x = j\omega\varepsilon\ E_y$$
$$\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = j\omega\varepsilon\ E_z \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (5\text{–}4)$$

ومن معادلة (4) نحصل على :–

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} + j\beta\ E_y = -j\omega\mu\ H_x$$
$$-\frac{\partial E_z}{\partial x} + j\beta\ E_x = -j\omega\mu\ H_y$$
$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -j\omega\mu\ H_z \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (6\text{–}4)$$

للحصول على معادلات الموجه بالنسبة للمجالين $(\mathbf{H}, \mathbf{E})$ نتبع سلسلة من الخطوات الرياضية الطويلة لنحصل على :–

$$H_x = -\frac{\gamma}{h^2}\frac{\partial H_z}{\partial x} + \frac{j\,\omega\epsilon}{h^2}\frac{\partial E_z}{\partial y} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (7\text{–}4)$$
$$H_y = -\frac{\gamma}{h^2}\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{j\,\omega\epsilon}{h^2}\frac{\partial E_z}{\partial x} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (8\text{–}4)$$
$$E_x = -\frac{\gamma}{h^2}\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{j\,\omega\mu}{h^2}\frac{\partial H_z}{\partial y} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (9\text{–}4)$$
$$E_y = -\frac{\gamma}{h^2}\frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{j\,\omega\mu}{h^2}\frac{\partial H_z}{\partial x} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (10\text{–}4)$$

حيث ان

$$h^2 = \omega^2 \mu \epsilon + \gamma^2 \qquad \text{............} \; (11-4)$$

اعتمادا على المركبتين (H_z, E_z) توجد هنالك **ثلاث** حالات للانتشار هي:-

1) عندما $(H_z = E_z = 0)$ وهي تطابق حالة الموجة (TEM) والتي لا يمكن ان توجد في دليل الموجة.
2) عندما $(H_z \neq 0 \, , E_z = 0)$ فيها يكون نمط الموجة (TE) موجود داخل الدليل.
3) عندما $(E_z \neq 0, H_z = 0)$ فيها يكون نمط الموجة (TM) موجود داخل الدليل.

<u>خواص الانتشار وترددات القطع لدليل الموجة تعامدية المجال المغناطيسي TM</u>

من علاقات رياضـــية طويلة اجريت لحل المعادلات (4-7) و(4-8) و(4-9) و(4-10) وجدنا ان حل معادلة الموجة عند انتقال النمط (TM) داخل دليل الموجة مســـتطيل المقطع هو:-

$$E_z = c \, sin\,(Bx) \sin(Ay) \qquad \text{............} \; (12-4)$$

عندما يكون عرض الدليل $(x = a)$ فان $E_z = 0$ فاننا نحصل على :-

$$E_z = 0 = c \, sin\,(Ba) \sin(Ay)$$

$$\rightarrow \; Ba = m\pi$$

$$\rightarrow \; B = \frac{m\pi}{a}$$

وعندما يكون طول الدليل $(y = b)$ فان $E_z = 0$ فاننا نحصل على :-

$$E_z = 0 = c \, sin\,(Bx) \sin(Ab)$$

$$\rightarrow \ Ab = n\pi$$
$$\rightarrow \ A = \frac{n\pi}{b}$$

عليه فان:–

$$E_z = c\, sin\, \left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin(\frac{n\pi}{b}y) \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \ (13\text{–}4)$$

حيث ان (m,n) هي اعداد صحيحة.

وبالرجوع للمعادلات الرياضية نجد ان :–

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \ - \omega^2\mu\epsilon} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \ (14\text{–}4)$$
$$\because \ \gamma = \alpha + j\beta$$

علية فان:–

1) اذا كانت قيمة (γ) **حقيقية** فان (α) لها قيمة محدودة.
2) اذا كانت قيمة (γ) **خيالية** فان انتشار الموجة داخل الدليل يكون بدون اضمحلال.
3) اذا كانت $(\beta = 0)$ فانه **لايمكن انتشار** الموجة خلال دليل الموجة متعامد الجدران.

عليه فان **انتشار** الموجة خلال الدليل المتعامد الجدران **يشترط**

$$\left[\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2\right] < \ \omega^2\mu\epsilon$$

من اعلاه نلاحظ اننا يمكن ان نتحكم بالتردد الزاوي (ω) فقط وتغيره. وبالتالي فان هنالك قيم معينة للتردد **لايمكن** عندها انتشار لموجة داخل الدليل، وان هذه الترددات تسمى **بتردد القطع** (ω_c) وقيمتها:–

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{\mu\epsilon}\left[\frac{1}{\mu\epsilon}\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2\right]} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots \ (15\text{–}4)$$

$$\therefore f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}}\sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2} \quad \text{............ (16-4)}$$

حيث ان (f_c) هو تردد القطع الخطي والذي عنده لايكون اي انتشار للموجة داخل الدليل.
ففي حالة (f_c) **اقل** من التردد الطبيعي فان الموجة تنتشر في دليل الموجة بدون اضمحلال.

يمكن كتابة النمط (TM) بدلالة (m,n) حيث يكون بالشكل $(TM_{m,n})$ وبالتالي فان النمط $(TM_{1,1})$ هو النمط المهيمن عند اقل قيمة لكلا" من(m,n).