

الاتحاد الدولي للاتصالات

ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.527-6
(2021/09)

الخصائص الكهربائية لسطح الأرض

السلسلة P
انتشار الموجات الراديوية

تمهيد

يضع قطاع الاتصالات الراديوية دور يتمثل في تأمين الترشيد والإنصاف والفعالية والاقتصاد في استعمال طيف الترددات الراديوية في جميع خدمات الاتصالات الراديوية، بما فيها الخدمات الساتلية، وإجراء دراسات دون تحديد مدى الترددات، تكون أساساً لإعداد التوصيات واعتمادها. ويؤدي قطاع الاتصالات الراديوية وظائفه التنظيمية والسياساتية من خلال المؤتمرات العالمية والإقليمية للاتصالات الراديوية وجمعيات الاتصالات الراديوية بمساعدة لجان الدراسات.

سياسة قطاع الاتصالات الراديوية بشأن حقوق الملكية الفكرية (IPR)

يرد وصف للسياسة التي يتبعها قطاع الاتصالات الراديوية فيما يتعلق بحقوق الملكية الفكرية في سياسة البراءات المشتركة بين قطاع تقييس الاتصالات وقطاع الاتصالات الراديوية والمنظمة الدولية للتوحيد القياسي واللجنة الكهروتقنية الدولية (ITU-T/ITU-R/ISO/IEC) والمشار إليها في القرار ITU-R 1. وترد الاستثمارات التي ينبغي لحاملي البراءات استعمالها لتقديم بيان عن البراءات أو للتصريح عن منح رخص في الموقع الإلكتروني <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en> حيث يمكن أيضاً الاطلاع على المبادئ التوجيهية الخاصة بتطبيق سياسة البراءات المشتركة وعلى قاعدة بيانات قطاع الاتصالات الراديوية التي تتضمن معلومات عن البراءات.

سلاسل توصيات قطاع الاتصالات الراديوية

(يمكن الاطلاع عليها أيضاً في الموقع الإلكتروني <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

العنوان	السلسلة
البث الساتلي	BO
التسجيل من أجل الإنتاج والأرشفة والعرض؛ الأفلام التلفزيونية	BR
الخدمة الإذاعية (الصوتية)	BS
الخدمة الإذاعية (التلفزيونية)	BT
الخدمة الثابتة	F
الخدمة المتنقلة وخدمة الاستدلال الراديوي وخدمة الهواة والخدمات الساتلية ذات الصلة	M
انتشار الموجات الراديوية	P
علم الفلك الراديوي	RA
أنظمة الاستشعار عن بُعد	RS
الخدمة الثابتة الساتلية	S
التطبيقات الفضائية والأرصاد الجوية	SA
تقاسم الترددات والتنسيق بين أنظمة الخدمة الثابتة الساتلية والخدمة الثابتة	SF
إدارة الطيف	SM
التجميع الساتلي للأخبار	SNG
إرسالات الترددات المعيارية وإشارات التوقيت	TF
المفردات والمواضيع ذات الصلة	V

ملاحظة: تمت الموافقة على النسخة الإنكليزية لهذه التوصية الصادرة عن قطاع الاتصالات الراديوية بموجب الإجراء الموضح في القرار ITU-R 1.

النشر الإلكتروني

جنيف، 2022

© ITU 2022

جميع حقوق النشر محفوظة. لا يمكن استنساخ أي جزء من هذا المنشور بأي شكل كان ولا بأي وسيلة إلا بإذن خطي من الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU).

ITU-R P.527-6 التوصية

الخصائص الكهربائية لسطح الأرض

(2021-2019-2017-1992-1982-1978)

مجال التطبيق

تقدم هذه التوصية أساليب لنمذجة الخصائص الكهربائية لسطح الأرض، بما في ذلك المياه النقية ومياه البحر والجليد والترية والغطاء النباتي، في ترددات تصل إلى 1 000 GHz، بطريقة منهجية تستند إلى تقييم السماحية النسبية المعقدة. وفي جميع الحالات، يمكن حساب الإيصالية من هذه التقييمات كدالة للتردد ودرجة الحرارة. ويُحتفظ في المرفق بالملحق 1 بالمعلومات السابقة عن الخصائص الكهربائية في ترددات تقل عن 30 MHz من حيث السماحية والإيصالية، وذلك بسبب ارتباطها بالتوصيتين ITU-R P.368 و ITU-R P.832. ويتوافق أسلوب النمذجة الجديد تماماً مع تلك المعلومات السابقة.

مصطلحات أساسية

السماحية المعقدة، الإيصالية، عمق الاختراق، سطح الأرض، الماء، الغطاء النباتي، التربة، الجليد.

إن جمعية الاتصالات الراديوية للاتحاد الدولي للاتصالات،

إذ تضع في اعتبارها

(أ) أن الخصائص الكهربائية يمكن التعبير عنها بثلاث معلمات هي: النفاذية المغناطيسية، والسماحية الكهربائية، ϵ ، والإيصالية الكهربائية، σ ؛

(ب) أن نفاذية سطح الأرض، μ ، يمكن اعتبارها عادةً مساوية للنفاذية في الفراغ؛

(ج) أن الخواص الكهربائية لسطح الأرض يمكن التعبير عنها بواسطة السماحية المعقدة أو، بالقدر نفسه، بواسطة الجزء الحقيقي والجزء التخيلي من السماحية المعقدة؛

(د) أن الحاجة تدعو إلى معلومات عن اختلاف عمق الاختراق باختلاف التردد؛

(هـ) أن معرفة الخصائص الكهربائية لسطح الأرض تلزم لأغراض متعددة في نمذجة الانتشار، بما في ذلك شدة إشارة موجة الأرض والانعكاس عن الأرض في مطراف أرضي والتداخل بين محطات الطيران و/أو المحطات الفضائية بسبب الانعكاسات أو الانتثار عن سطح الأرض، وتطبيقات علوم الأرض؛

(و) أن التوصية ITU-R P.368 تتضمن منحنيات انتشار موجة الأرض من 1 MHz إلى 30 MHz في ظروف أرضية مختلفة تتسم بالسماحية والإيصالية الكهربائية؛

(ز) أن التوصية ITU-R P.832 تحتوي على أطلس علمي للإيصالية الكهربائية الأرضية في ترددات تقل عن 1 MHz،

توصي

باستخدام المعلومات الواردة في الملحق 1 لنمذجة الخصائص الكهربائية لسطح الأرض.

الملحق 1

1 مقدمة

يقدم هذا الملحق أساليب تنبؤ تتنبأ بالخصائص الكهربائية لأسطح الأرض التالية في ترددات تصل إلى 1 000 GHz:

- مياه
- مياه البحر (أي المياه المالحة)
- جليد جاف ورطب
- تربة جافة ورطبة (مزيج من الرمل والطين والطيني)
- غطاء نباتي (فوق وتحت درجة التجمد)

2 السماحية المعقدة

يمكن تشخيص خصائص سطح الأرض بثلاث معالم:

- النفاذية المغناطيسية، μ
- السماحية الكهربائية، ϵ
- الإيصالية الكهربائية¹، σ .

النفاذية المغناطيسية هي مقياس لقدرة المادة على دعم تكوين مجال مغناطيسي داخلها استجابة لمجال مغناطيسي مطبق؛ أي كثافة التدفق المغناطيسي B مقسومة على شدة المجال المغناطيسي H . والسماحية الكهربائية هي مقياس لقدرة المادة على معارضة مجال كهربائي؛ أي كثافة التدفق الكهربائي D مقسومة على شدة المجال الكهربائي E . والإيصالية الكهربائية هي مقياس لقدرة المادة على إيصال تيار كهربائي؛ بمعنى نسبة كثافة التيار في المادة إلى المجال الكهربائي الذي يسبب تدفق التيار.

وبوجود موجة مستوية واردة $\vec{E}(r, t) = \vec{E}_0 e^{j(\omega t - kr)}$ ، بتردد شعاعي ω ، ووقت t ، ونفاذية مغناطيسية μ ، وسماحية كهربائية ϵ ، وإيصالية كهربائية σ ، ومتجه رقم موجة انتشار \vec{k} ، يعطى اتساعها k كما يلي:

$$(1a) \quad k = \sqrt{-j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

وقيم الفراغ للسماحية والنفاذية والإيصالية هي:

- سماحية الفراغ $\epsilon_0 = 8.854\ 187\ 817 \times 10^{-12}$ (F/m)
- نفاذية الفراغ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (N/A²)
- إيصالية الفراغ $\sigma_0 = 0.0$ (S/m)

ومن المناسب تعريف السماحية النسبية، ϵ_r ، والنفاذية النسبية، μ_r ، بالنسبة إلى قيمتهما في الفراغ على النحو التالي:

- السماحية النسبية $\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$
- النفاذية النسبية $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$

حيث ϵ و μ هما السماحية والنفاذية المصاحبتين للوسط. وتفترض هذه التوصية $\mu = \mu_0$ ، وفي تلك الحالة $\mu_r = 1$.

¹ يطلق عليها الإيصالية الكهربائية لتميزها عن الإيصاليات الأخرى مثل الإيصالية الحرارية والإيصالية الهيدروليكية. وتدعى فيما بعد باسم الإيصالية.

وعلى النحو المبين في المعادلة (1a)، يعتمد رقم الموجة على كل من σ و ϵ معاً، وليس على أي منهما بشكل منفصل. وكذلك تعتمد صيغ العلامات الفيزيائية الأخرى التي تصف مختلف آليات انتشار الموجات الراديوية مثل المقطع العرضي المتناثر ومعاملات الانعكاس وزوايا الانكسار، على قيم هذه التوليفة. وعلاوة على ذلك، فإن الجذر التربيعي لهذه التوليفة يساوي صيغة مؤشر الانكسار المستخدمة في تشخيص التروبوسفير والأيونوسفير. ويستخدم مؤشر الانكسار أيضاً في تشخيص المواد المختلفة في الموجات المليمترية والنطاقات الترددية البصرية. وتبعاً لذلك، لتبسيط الصيغ التي تصف آليات الانتشار المختلفة ولتقيس مصطلحات الخصائص الكهربائية في نطاقات ترددية مختلفة، تعرّف التوليفة $\epsilon - \frac{j\sigma}{\omega}$ على أنها السماحية المعقدة وتستخدم لوصف الخصائص الكهربائية للمواد.

وبينما تشير السماحية إلى ϵ ، وتشير السماحية النسبية إلى ϵ_r ، تشير السماحية النسبية المعقدة المعروفة بالصيغة $\epsilon_r' - j\epsilon_r''$ إلى:

$$(1b) \quad \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - j\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$$

حيث يمكن للسماحية ϵ أن تكون معقدة.

وفي المعادلة (1b)، ϵ_r' هي الجزء الحقيقي من السماحية المعقدة، و ϵ_r'' هي الجزء التخيلي من السماحية المعقدة. ويرتبط الجزء الحقيقي من السماحية النسبية المعقدة، ϵ_r' ، بالطاقة المخزنة عندما تتعرض المادة إلى مجال كهرومغناطيسي. ويؤثر الجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة، ϵ_r'' ، على امتصاص الطاقة ويعرف بعامل الخسارة. وترتبط علامة ناقص في المعادلة (1b) بمجال كهرومغناطيسي له اعتماد زمني هو $e^{2j\pi f t}$ (f هو التردد بوحدة Hz، و t هو الوقت بالثواني). وإذا كان الاعتماد الزمني $e^{-2j\pi f t}$ ، يستعاض عن علامة ناقص (-) في المعادلة (1b) بعلامة زائد (+).

وعلى ترددات تصل إلى 1 000 GHz، يُعزى التبدد داخل سطح الأرض إلى حركة الشحنة الانتقالية (تيار الإيصال) أو حركة الشحنة الاهتزازية (الاهتزاز ثنائي القطب)، فيمكن تفكيك الجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة، ϵ_r'' ، إلى حدين:

$$(2) \quad \epsilon_r'' = \epsilon_d'' + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0}$$

حيث يمثل ϵ_d'' التبدد الناجم عن تيار الإزاحة المرتبط بالاهتزاز ثنائي القطب، ويمثل $\frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0}$ التبدد الناجم عن تيار الإيصال.

ويتكون تيار الإيصال من حركة الانتقال الإجمالية للشحنات الحرة وهو التيار الوحيد على تردد صفري (أي التيار المستمر). ويكون تيار الإيصال أكبر من تيار الإزاحة في الترددات الواقعة تحت تردد الانتقال، f_t ، ويكون تيار الإزاحة أكبر من تيار الإيصال في الترددات الواقعة فوق تردد الانتقال، f_t . ويعرّف تردد الانتقال، f_t ، على أنه التردد الذي يتساوى عنده تيار الإيصال والإزاحة، كما يلي:

$$(3) \quad f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0\epsilon_d''}$$

وفي المواد العازلة غير الموصلة (بدون خسارة)، $\sigma = 0$ ، وبالتالي $\epsilon_d'' = \epsilon_r''$. وفي بعض هذه المواد، مثل التربة الجافة والغطاء النباتي الجاف، $\epsilon_d'' = 0$ ، ومن ثم $\epsilon_r'' = 0$ ، بصرف النظر عن التردد، وهو ما يُنظر فيه في الفقرة 3.2.1.2 من التوصية ITU-R P.2040. ومن ناحية أخرى، في بعض المواد الأخرى غير الموصلة، مثل الماء النقي والجليد الجاف، ϵ_d'' ، وبالتالي ϵ_r'' تساوي صفراً عند التردد الصفري حصراً. وعليه، لا يمكن تطبيق الفقرة 3.2.1.2 من التوصية ITU-R P.2040 على هذه المواد.

وفي المواد العازلة الموصلة (المخمّدة)، مثل مياه البحر والتربة الرطبة، تتخذ الإيصالية الكهربائية، σ ، قيمةً متناهية غير الصفر. ووفقاً لذلك، فيما ينجح التردد نحو الصفر، ينجح الجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة لهذه المواد نحو ∞ بشكل يمكن استنتاجه من المعادلة (3). وفي هذه الحالة، من الأسهل العمل مع الإيصالية σ بدلاً من الجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة التي يمكن كتابتها من المعادلة (2)، بعد ضبط $\epsilon_d'' = 0$ ، كما يلي:

$$(3a) \quad \sigma = 2\pi\epsilon_0 f \epsilon_r'' = 0.05563 f_{\text{GHz}} \epsilon_r''$$

حيث f_{GHz} هو التردد بوحدة GHz. ويؤدي تعميم الصياغة الواردة أعلاه على ترددات أخرى، على غرار ما جرى بواسطة المعادلة (12) في التوصية ITU-R P.2040، إلى الحصول على مجموع حدين: حد واحد يعطي الإيصالية الكهربائية فيما يبين الحد الآخر تبديد الطاقة المرتبط بتيار الإزاحة.

وتقدم هذه التوصية أساليب التنبؤ للأجزاء الحقيقية والتخيلية من السماحية النسبية المعقدة، ϵ'_r و ϵ''_r ، وتوضح أشكال الأمثلة المصاحبة اتجاهات الأجزاء الحقيقية والتخيلية من السماحية النسبية المعقدة على اختلاف التردد في ظروف بيئية مختلفة.

1.2 تعدد الطبقات الأرضية

تنطبق النماذج الواردة في الفقرة 5 على تربة متجانسة تحت السطح؛ ومع ذلك، يندر أن يكون ما تحت السطح متجانساً. بل إنه يتكون من طبقات متعددة ذات سماكات مختلفة وخصائص كهربائية مختلفة يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار باستحداث مفهوم المعلمات الفعالة لتمثيل التربة المتجانسة. ويمكن استخدام المعلمات الفعالة مع منحنيات انتشار موجة الأرض الأرضية المتجانسة في التوصية ITU-R P.368.

3 عمق الاختراق

إن المدى الذي تؤثر فيه الطبقات الدنيا على الخصائص الكهربائية الفعالة لسطح الأرض يعتمد على عمق اختراق الطاقة الراديوية، δ ، الذي يعرف بأنه العمق الذي يهبط عنده اتساع شدة مجال الإشعاع الكهرومغناطيسي داخل المادة إلى $1/e$ (حوالي 37%) من قيمته الأصلية عند السطح (أو بعبارة أصح، تحت السطح مباشرة). ويعطى عمق الاختراق، δ ، في وسط متجانس للسماحية النسبية المعقدة $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ بواسطة:

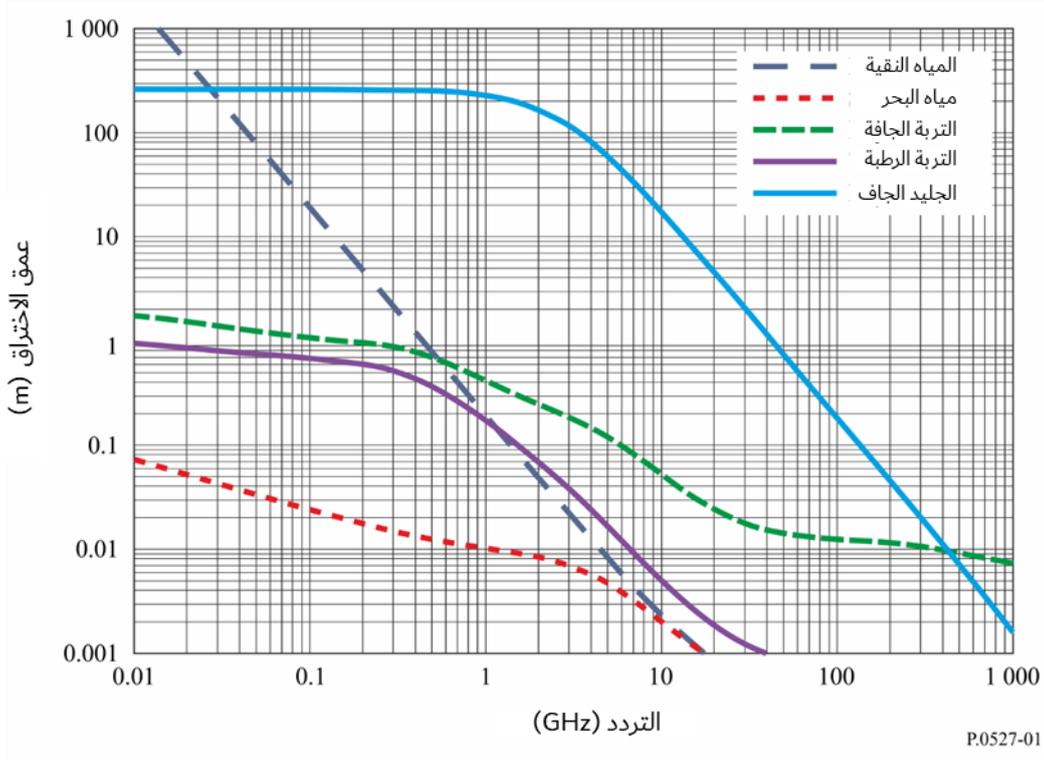
$$(4) \quad \delta = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(\epsilon'_r)^2 + (\epsilon''_r)^2} - \epsilon'_r}} \quad (\text{m})$$

حيث λ هو طول الموجة بالأمتار؛ علماً بأن الجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة في المعادلة (4) بينما ينجح نحو الصفر، ينجح عمق الاختراق نحو ما لا نهاية.

ويصور الشكل 1 القيم النمطية لعمق الاختراق كدالة للتردد لأنواع مختلفة من مكونات سطح الأرض بما فيها المياه النقية ومياه البحر والترية الجافة والترية الرطبة والجليد الجاف. وتُحسب أعماق اختراق المياه النقية ومياه البحر في حرارة 20 درجة مئوية، حيث تبلغ ملوحة مياه البحر 35 g/kg. وتفترض أعماق اختراق التربة الجافة والترية الرطبة أن محتوى الماء الحجمي هو 0,07 و 0,5، على التوالي. ومعلمات التربة الأخرى هي نفسها كما في الشكل 7. ويُحسب عمق اختراق الجليد الجاف في حرارة 0 درجة مئوية.

الشكل 1

عمق اختراق أنواع السطوح تبعاً للتردد



4 العوامل التي تحدد الخصائص الكهربائية الفعالة للتربة

تحدد القيم الفعالة للخصائص الكهربائية للتربة من طبيعة التربة ومما فيها من الرطوبة المحتواة ودرجة الحرارة والبنية الجيولوجية العامة وتردد الإشعاع الكهرومغناطيسي الوارد.

1.4 طبيعة التربة

على الرغم مما أثبتته العديد من القياسات بشأن تغير قيم الخصائص الكهربائية للتربة بتغير طبيعة التربة، قد يرجع هذا التغير إلى قدرة التربة على امتصاص الرطوبة والحفاظ عليها بدلاً من التركيب الكيميائي للتربة. وقد تبين أن الصلصال ذا الإيصالية القريبة من 10^{-2} S/m عادة، يمكن، عندما يجف، أن تنخفض إيصاليته لتصل إلى 10^{-4} S/m، وهو نفس ترتيب الغرانيت.

2.4 الرطوبة المحتواة

إن محتوى الأرض من الرطوبة هو العامل الرئيسي الذي يحدد سماحية وإيصالية التربة. وقد أظهرت القياسات المختبرية أنه زيادة محتوى الأرض من الرطوبة من قيمة منخفضة، تزيد سماحية وإيصالية الأرض وتصل إلى قيمهما القصوى مع اقتراب الرطوبة المحتواة من القيم الموجودة عادة في هذه التربة. وفي أعماق متر واحد أو أكثر، تثبت عادةً رطوبة التربة في موقع معين. وعلى الرغم من أن البلل قد يزداد خلال فترات المطر، فإن الرطوبة تعود إلى قيمتها النمطية بعد توقف المطر بسبب الصرف والتبخر السطحي.

وقد يختلف كثيراً المحتوى النمطي من الرطوبة في تربة معينة من موقع إلى آخر بسبب الاختلافات في البنية الجيولوجية العامة التي تقدم تصريفاً مختلفاً.

3.4 درجة الحرارة

أظهرت القياسات المختبرية للخصائص الكهربائية للتربة أن الإيصالية ترتفع بحوالي 3% لكل درجة مئوية عند الترددات المنخفضة، في حين تثبت السماحية تقريباً على اختلاف درجات الحرارة. وعند نقطة التجمد، يطرأ انخفاض كبير على كل من الإيصالية والسماحية.

4.4 الاختلاف الموسمي

ترجع آثار الاختلاف الموسمي في الخصائص الكهربائية لسطح التربة بشكل رئيسي إلى التغيرات في المحتوى المائي ودرجة حرارة الطبقة العليا من التربة.

5 أساليب التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة

تقدم الأقسام الفرعية التالية أساليب التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة لأسطح الأرض التالية:

- مياه نقية (الفقرة 1.1.5)
- مياه البحر (أي المياه المالحة) (الفقرة 2.1.5)
- الجليد النقي (الفقرة 1.3.1.5)
- المحلول الملحي لجليد البحر (الفقرة 2.3.1.5)
- جليد البحر (جليد السنة الأولى (FYI) وجليد متعدد السنوات) (الفقرة 3.3.1.5)
- الجليد (جليد جاف، وجليد رطب) (الفقرة 4.1.5)
- رغاوي البحر (الفقرة 5.1.5)
- تربة جافة (مزيج من الرمل والطين والطيني والماء) (الفقرة 2.5)
- غطاء نباتي (فوق وتحت نقطة التجمد) (الفقرة 3.5).

وفي هذا القسم، تُذكر اللاحقات السفلية للأجزاء الحقيقية والتخيلية للسماحية النسبية المعقدة على النحو التالي: "pw" للمياه النقية، و"sw" لمياه البحر، و"ice" للجليد النقي، و"b" للمحلول الملحي لجليد البحر، و"m" لجليد البحر، و"ds" للجليد الجاف، و"ws" للجليد الرطب، و"f" لرغاوي البحر، و"soil" للتربة. وتعتمد السماحية النسبية المعقدة للمياه النقية ومياه البحر والجليد النقي والمحلول الملحي لجليد البحر على خصائص مكوناتها الفردية، وبالتالي، فإن السماحية النسبية المعقدة لجليد البحر والجليد ورغاوي البحر والتربة والغطاء النباتي قائمة على خليط من مكونين أو أكثر.

1.5 المياه

يقدم هذا القسم الفرعي أساليب التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة للمياه النقية ومياه البحر ورغاوي البحر، والجليد (الجليد النقي، والمحلول الملحي لجليد البحر، وجليد البحر)، والجليد (الجليد الجاف والجليد الرطب).

إن القسمين 1.1.5 و 2.1.5 صالحان لدرجات حرارة $-4^{\circ}\text{C} \leq T \leq 40^{\circ}\text{C}$ وملوحة $0 \text{ ppt} \leq S \leq 40 \text{ ppt}$ ، حيث "ppt" أجزاء في كل ألف جزء.

1.1.5 المياه النقية

السماحية النسبية المعقدة للمياه النقية، ϵ_{pw} ، هي دالة للتردد، f_{GHz} (GHz) ودرجة الحرارة، $T(^{\circ}\text{C})$:

$$(5) \quad \epsilon_{pw} = \epsilon'_{pw} - j \epsilon''_{pw}$$

$$(6) \quad \epsilon'_{pw} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_{\infty}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} + \epsilon_{\infty}$$

$$(7) \quad \varepsilon''_{pw} = \frac{(f_{GHZ}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{GHZ}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHZ}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_{\infty})}{1 + (f_{GHZ}/f_2)^2}$$

حيث:

$$(8) \quad \varepsilon_s = 77.66 + 103.3\theta$$

$$(9) \quad \varepsilon_1 = 0.0671\varepsilon_s$$

$$(10) \quad \varepsilon_{\infty} = 3.52 - 7.52\theta$$

$$(11) \quad \theta = \frac{300}{T + 273.15} - 1$$

و f_1 و f_2 هما ترددا استرخاء ديبي (Debye):

$$(12) \quad f_1 = 20.20 - 146.4\theta + 316\theta^2 \quad (\text{GHz})$$

$$(13) \quad f_2 = 39.8 f_1 \quad (\text{GHz})$$

2.1.5 مياه البحر

السماحية النسبية المعقدة للمياه البحرية (المالحة)، ε_{sw} ، هي دالة للتردد، f_{GHZ} (GHz) ودرجة الحرارة، T (°C) والملوحة S (g/kg) أو ppt².

$$(14) \quad \varepsilon_{sw} = \varepsilon'_{sw} - j \varepsilon''_{sw}$$

$$(15) \quad \varepsilon'_{sw} = \frac{\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{1s}}{1 + (f_{GHZ}/f_{1s})^2} + \frac{\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{\infty s}}{1 + (f_{GHZ}/f_{2s})^2} + \varepsilon_{\infty s}$$

$$(16) \quad \varepsilon''_{sw} = \frac{(f_{GHZ}/f_{1s})(\varepsilon_{ss} - \varepsilon_{1s})}{1 + (f_{GHZ}/f_{1s})^2} + \frac{(f_{GHZ}/f_{2s})(\varepsilon_{1s} - \varepsilon_{\infty s})}{1 + (f_{GHZ}/f_{2s})^2} + \frac{18\sigma_{sw}}{f_{GHZ}}$$

حيث:

$$(17) \quad \varepsilon_{ss} = \varepsilon_s \exp(-3.33330 \times 10^{-3}S + 4.74868 \times 10^{-6}S^2)$$

$$(18) \quad f_{1s} = f_1 \left(1 + S \left(\frac{2.3232 \times 10^{-3} - 7.9208 \times 10^{-5}T + 3.6764 \times 10^{-6}T^2}{+ 3.5594 \times 10^{-7}T^3 + 8.9795 \times 10^{-9}T^4} \right) \right) \quad (\text{GHz})$$

$$(19) \quad \varepsilon_{1s} = \varepsilon_1 \exp(-6.28908 \times 10^{-3}S + 1.76032 \times 10^{-4}S^2 - 9.22144 \times 10^{-5}TS)$$

$$(20) \quad f_{2s} = f_2 (1 + S(-1.99723 \times 10^{-2} + 1.81176 \times 10^{-4}T)) \quad (\text{GHz})$$

$$(21) \quad \varepsilon_{\infty s} = \varepsilon_{\infty} (1 + S(-2.04265 \times 10^{-3} + 1.57883 \times 10^{-4}T))$$

وتحصل قيم ε_s و ε_1 و ε_{∞} و f_1 و f_2 من المعادلات (8) و (9) و (10) و (12) و (13). علاوةً على ذلك، تعطى σ_{sw} بواسطة:

$$(22) \quad \sigma_{sw} = \sigma_{35} R_{15} R_{T15} \quad (S/m)$$

$$\sigma_{35} = 2.903602 + 8.607 \times 10^{-2} T + 4.738817 \times 10^{-4} T^2$$

$$(23) \quad -2.991 \times 10^{-6} T^3 + 4.3047 \times 10^{-9} T^4$$

$$(24) \quad R_{15} = S \frac{(37.5109 + 5.45216S + 1.4409 \times 10^{-2} S^2)}{(1004.75 + 182.283 S + S^2)}$$

$$(25) \quad R_{T15} = 1 + \frac{\alpha_0 (T-15)}{(\alpha_1 + T)}$$

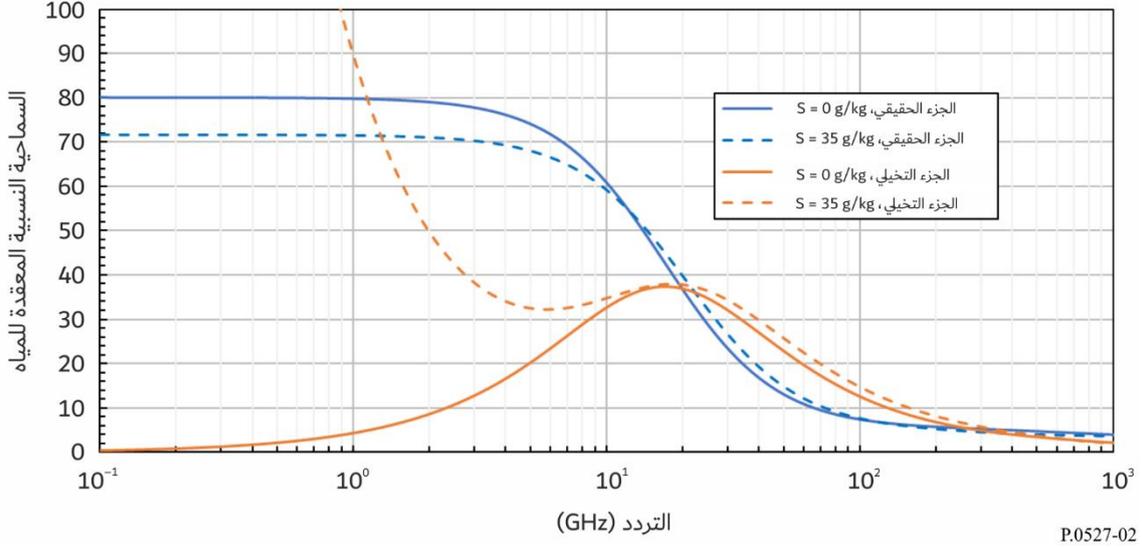
$$(26) \quad \alpha_0 = \frac{(6.9431 + 3.2841S - 9.9486 \times 10^{-2} S^2)}{(84.850 + 69.024 S + S^2)}$$

$$(27) \quad \alpha_1 = 49.843 - 0.2276 S + 0.198 \times 10^{-2} S^2$$

والسماحية النسبية المعقدة للمياه النقية المعطاة في المعادلات (5) إلى (7) هي حالة خاصة من المعادلات (14) إلى (16) حيث $S=0$. والسماحية النسبية المعقدة للمياه النقية ($S=0$ g/kg) ومياه البحر ($S=35$ g/kg) مقابل التردد موضحة في الشكل 2 بالنسبة إلى درجة الحرارة $T=20$ °C وفي الشكل 3 بالنسبة إلى درجة الحرارة $T=0$ °C.

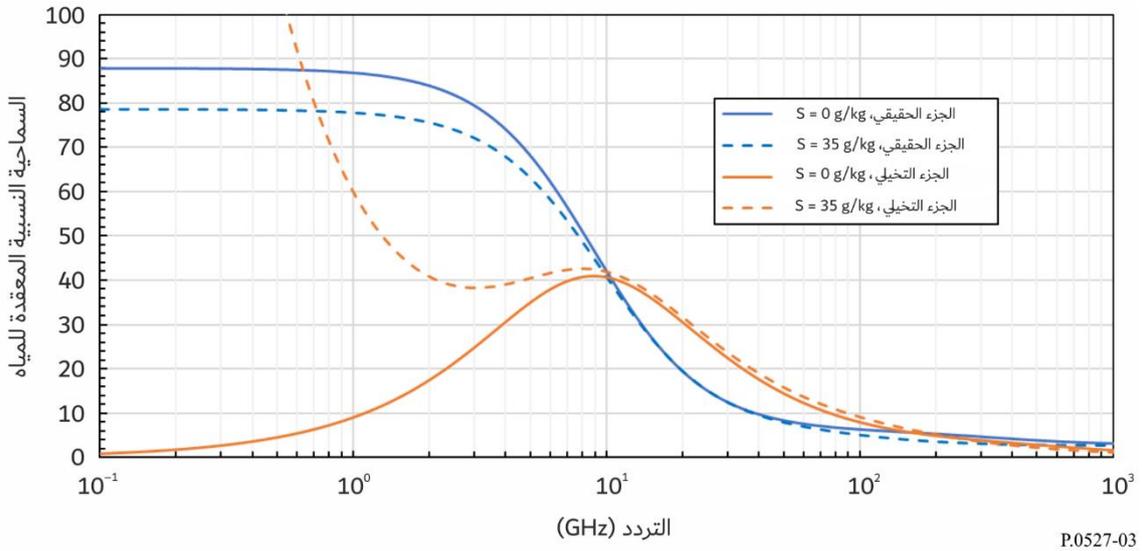
الشكل 2

السماحية النسبية المعقدة للمياه النقية ومياه البحر تبعاً للتردد
($T = 20$ °C)



الشكل 3

السماحية النسبية المعقدة للمياه النقية ومياه البحر تبعاً للتردد
($T = 0$ °C)



3.1.5 الجليد

يقدم هذا القسم أساليب التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة للجليد النقي والمحلول الملحي لجليد البحر وجليد البحر.

1.3.1.5 الجليد النقي

يتكون الجليد النقي من مياه نقية مجمدة (أي $-60\text{ °C} \leq T_{ice} \leq 0\text{ °C}$). ويُحصَل على السماحية النسبية المعقدة للجليد النقي، ϵ_{ice} ، من المعادلة:

$$(28) \quad \epsilon_{ice} = \epsilon'_{ice} - j \epsilon''_{ice}$$

والجزء الحقيقي من السماحية النسبية المعقدة للجليد النقي، ϵ_{ice} ، هو دالة في درجة الحرارة، T_{ice} (°C)، وهو مستقل عن التردد:

$$(29) \quad \epsilon'_{ice} = 3.1884 + 0.00091 T_{ice}$$

والجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة للجليد النقي، ϵ''_{ice} ، هو دالة في درجة الحرارة، T_{ice} (°C) للترددات، f_{GHz} (GHz)، حتى 1 000 GHz:

$$(30) \quad \epsilon''_{ice} = \frac{A}{f_{\text{GHz}}} + B f_{\text{GHz}}$$

حيث:

$$(31) \quad A = (0.00504 + 0.0062\theta) \exp(-22.1\theta)$$

$$(32) \quad B = \frac{0.0207}{T_{ice} + 273.15} \frac{\exp(-\tau)}{(\exp(-\tau) - 1)^2} + 1.16 \times 10^{-11} f_{\text{GHz}}^2 + \exp(-9.963 + 0.0372 T_{ice})$$

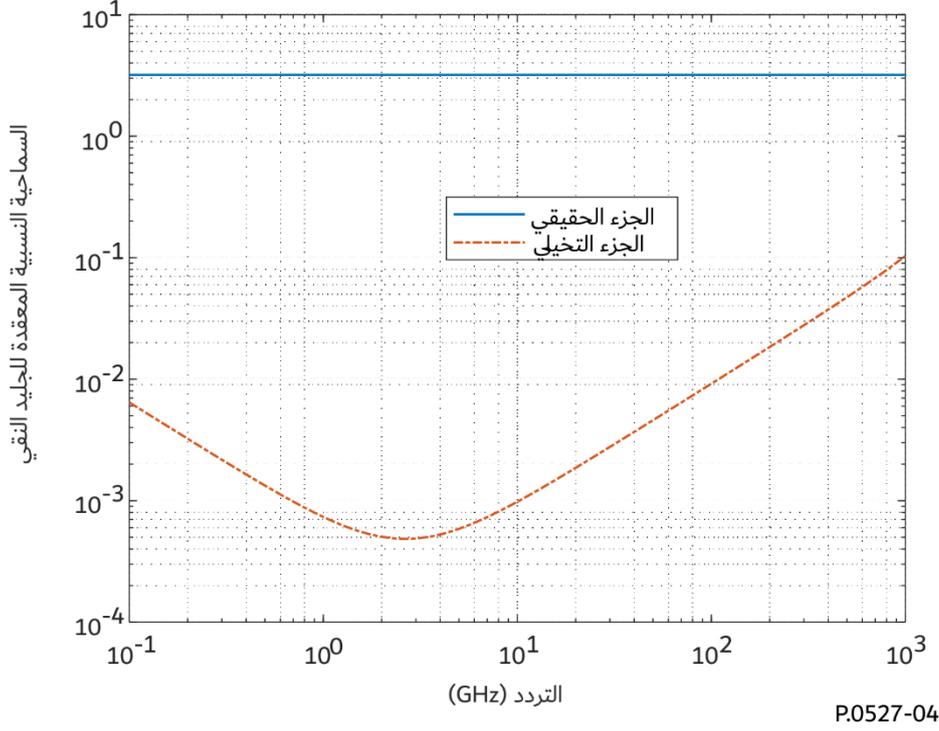
$$(33) \quad \tau = \frac{335}{T_{ice} + 273.15}$$

$$(34) \quad \theta = \frac{300}{T_{ice} + 273.15} - 1$$

ويظهر في الشكل 4 الجزآن الحقيقي (ϵ'_{ice}) والتخيلي (ϵ''_{ice}) من السماحية النسبية المعقدة للجليد النقي مقابل التردد في درجة الحرارة $T_{ice} = 0\text{ °C}$.

الشكل 4

السماحية النسبية المعقدة للجليد النقي مقابل للتردد
($T_{ice} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$)



2.3.1.5 المحلول الملحي لجليد البحر

المحلول الملحي لجليد البحر هو ماء نقي به ذرات ملح مذابة تكون موجودة أثناء تكوين جليد البحر. ويتم الحصول على السماحية النسبية المعقدة للمحلول الملحي لجليد البحر ϵ_b على النحو التالي:

$$(35) \quad \epsilon_b = \epsilon'_b - j\epsilon''_b$$

وفيما يتعلق بدرجات الحرارة $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_{ice} \leq -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ والترددات f_{GHz} (GHz) حتى 1 000 GHz فإن ϵ'_b و ϵ''_b هما:

$$(36) \quad \epsilon'_b = \epsilon_{b\infty} + \frac{\epsilon_{bs} - \epsilon_{b\infty}}{1 + (2\pi\tau f_{\text{GHz}})^2}$$

$$(37) \quad \epsilon''_b = \frac{2\pi\tau f_{\text{GHz}} (\epsilon_{bs} - \epsilon_{b\infty})}{1 + (2\pi\tau f_{\text{GHz}})^2} + \frac{18 \sigma_b}{f_{\text{GHz}}}$$

حيث:

$$(38a) \quad \epsilon_{b\infty} = \frac{82.79 + 8.19 T_{ice}^2}{15.68 + T_{ice}^2}$$

$$(38b) \quad \epsilon_{bs} = \frac{939.66 - 19.068 T_{ice}}{10.737 - T_{ice}}$$

$$(38c) \quad 2\pi\tau = 0.10990 + 0.13603 \times 10^{-2} T_{ice} + 0.20894 \times 10^{-3} T_{ice}^2 + 0.28167 \times 10^{-5} T_{ice}^3$$

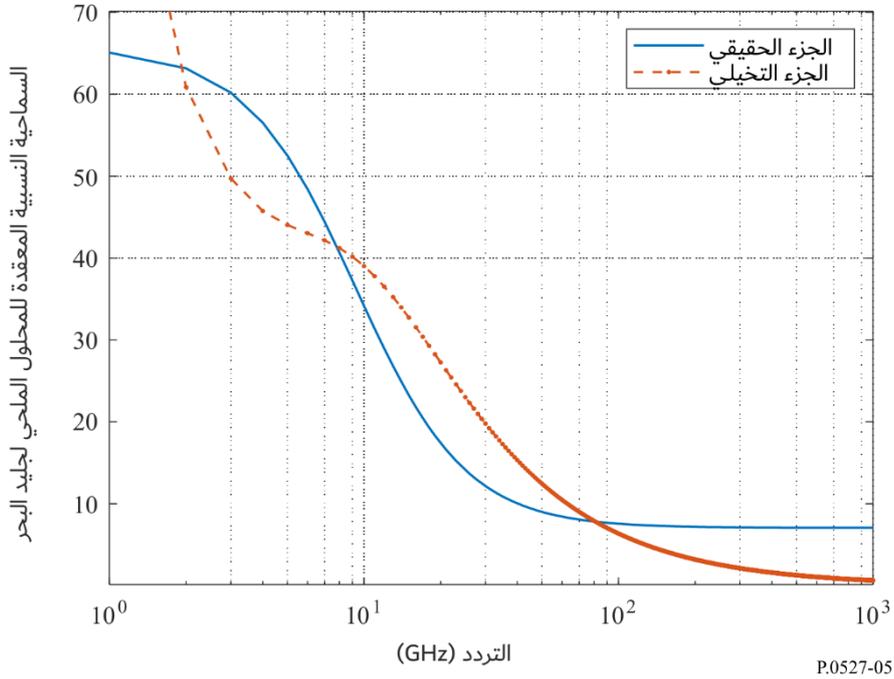
T_{ice} ($^{\circ}\text{C}$) هي درجة الحرارة، و σ_b (S/m) هي الإيصالية التي تعطىها المعادلة:

$$(39) \quad \sigma_b = \begin{cases} -T_{ice} \exp(0.5193 + 0.08755 T_{ice}), & T_{ice} \geq -22.9\text{ }^{\circ}\text{C} \\ -T_{ice} \exp(1.0334 + 0.1100 T_{ice}), & T_{ice} < -22.9\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

ويظهر الشكلان 5 و6 على التوالي الجزأين الحقيقي (ϵ'_b) والتخيلي (ϵ''_b) من السماحية النسبية المعقدة للمحلول الملحي لجليد البحر مقابل التردد لدرجة الحرارة $T_{ice} = -5^\circ\text{C}$ و -25°C .

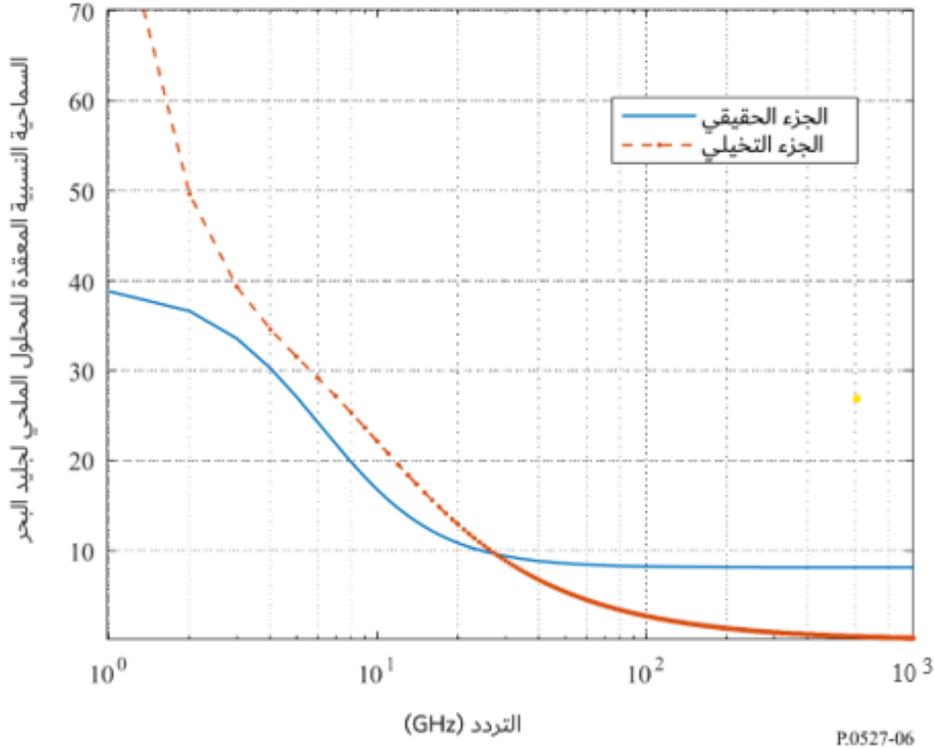
الشكل 5

السماحية النسبية المعقدة للمحلول الملحي لجليد البحر مقابل التردد
($T_{ice} = -5^\circ\text{C}$)



الشكل 6

المساحة النسبية المعقدة للمحلول الملحي لجليد البحر مقابل التردد
($T_{ice} = -25\text{ °C}$)



3.3.1.5 جليد البحر

هناك نوعان من جليد البحر: أ) جليد السنة الأولى، ب) جليد متعدد السنوات.

ويتكون جليد السنة الأولى من جيوب جليد نقي ومحلول ملحي لجليد البحر، إذ يعتمد شكل جيوب المحلول الملحي لجليد البحر على ما إذا كان جليد السنة الأولى عبارة عن جليد كريستالي أو جليد عمودي. والجليد الكريستالي هو عبارة عن مجموعة من بلورات الجليد السائبة والموجهة بشكل عشوائي وتكون على شكل إبر، والجليد العمودي عبارة عن مجموعة من بلورات الجليد في شكل إبر موجهة عمودياً. ويبلغ الحد الأقصى لسمك جليد السنة الأولى بين 0,3 متر و مترين.

والجليد متعدد السنوات هو الجليد الذي نجا من موسم ذوبان واحد على الأقل ويتضمن كمية أقل بكثير من المحلول الملحي لجليد البحر و جيوب هوائية أكثر من جليد السنة الأولى. ويبلغ سمك الجليد متعدد السنوات عادة من مترين إلى 4 أمتار، وتكون الجيوب الهوائية كروية الشكل.

وبالنسبة للجليد في السنة الأولى، يتم الحصول على حجم جزء المحلول الملحي لجليد البحر v_b ، من المعادلة:

$$(40) \quad v_b = \frac{\rho_{ice} S_{ice}}{F_1(T_{ice}) - \rho_{ice} S_{ice} F_2(T_{ice})}$$

حيث إن ρ_{ice} (g/cm^3) هي كثافة جليد البحر المعطاة من المعادلة:

$$(41) \quad \rho_{ice} = 0.917 - 1.403 \times 10^{-4} T_{ice}$$

T_{ice} ($^{\circ}\text{C}$) هي درجة حرارة الجليد، $-30\text{ °C} \leq T_{ice} \leq -2\text{ °C}$ و S_{ice} (ppt) هي ملوحة جليد البحر، حيث:

$$(42) \quad S_{ice} = \begin{cases} 7.88 - 1.59 h_{ice}, & h_{ice} > 0.3573 \text{ m} \\ 14.24 - 19.39 h_{ice}, & h_{ice} \leq 0.3573 \text{ m} \end{cases}$$

و h_{ice} (m) هو سمك جليد البحر. ويتم حساب F_2 و F_1 على النحو التالي باستخدام المعاملات الواردة في الجدول 1:

$$(43) \quad F_i(T_{ice}) = \alpha_0 + \alpha_1 T_{ice} + \alpha_2 T_{ice}^2 + \alpha_3 T_{ice}^3, i = 1, 2$$

الجدول 1

المعاملات α_0 و α_1 و α_2 و α_3

$-22.9^\circ\text{C} \leq T_{ice} \leq -2^\circ\text{C}$		$-30^\circ\text{C} \leq T_{ice} \leq -22.9^\circ\text{C}$		المعامل
$F_2(T_{ice})$	$F_1(T_{ice})$	$F_2(T_{ice})$	$F_1(T_{ice})$	
0,089 03	4,732-	8,547	9 899	α_0
0,017 63-	22,45-	1,089	1 309	α_1
0,000 533-	0,639 7-	0,045 18	55,27	α_2
0,000 008 801-	0,010 74-	0,000 581 9	0,716	α_3

1.3.3.1.5 السماحية النسبية المعقدة لجليد السنة الأولى

يقدم هذا القسم الفرعي طرائق من أجل التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة لجليد السنة الأولى الكريستالي والعمودي. وطرائق التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة الواردة في هذا القسم قابلة للتطبيق في درجات حرارة $-30^\circ\text{C} \leq T_{ice} \leq -2^\circ\text{C}$ وترددات تصل إلى 100 GHz.

أ) السماحية النسبية المعقدة لجليد البحر الكريستالي

فيما يتعلق بالجليد الكريستالي الذي تكون فيه جيوب المحلول الملحي عبارة عن إبر موجهة عشوائياً، تكون السماحية النسبية المعقدة متناحية وتعطى بالمعادلة:

$$(44) \quad \varepsilon_m = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

حيث:

$$(45a) \quad A = 3$$

$$(45b) \quad B = (3 - 5v_b)(\varepsilon_b - \varepsilon_{ice})$$

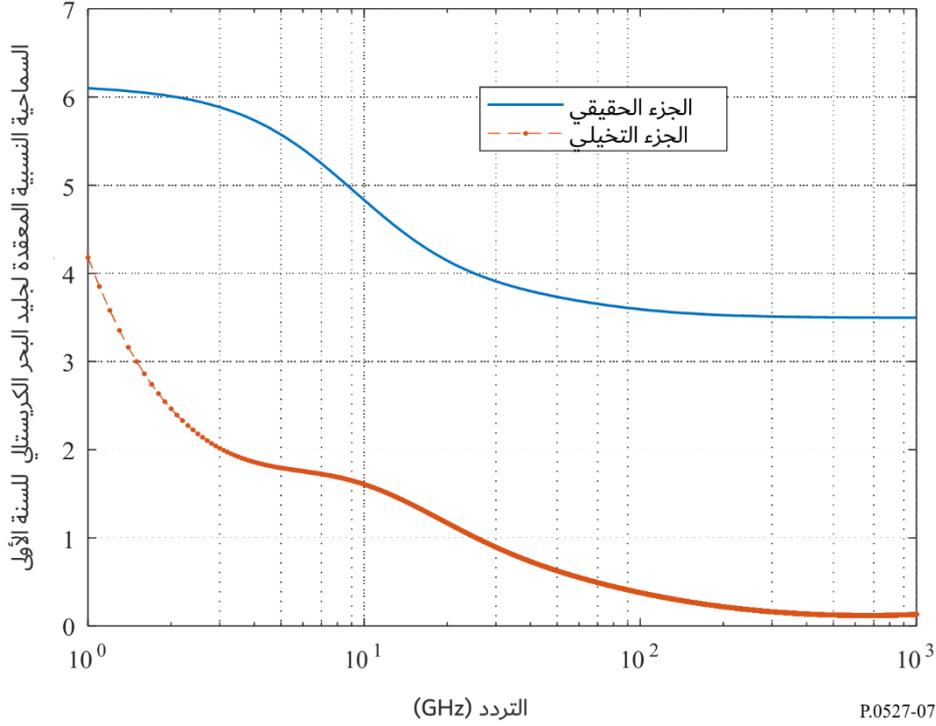
$$(45c) \quad C = -(3 - v_b)\varepsilon_b\varepsilon_{ice} - v_b(\varepsilon_b)^2$$

ويتم حساب ε_{ice} ، و ε_b و v_b عن طريق المعادلات (28) و (35) و (40) على التوالي.

ويوضح الشكل 7 الجزء الحقيقي ($Re\{\varepsilon_m\}$) والجزء التخيلي ($Im\{\varepsilon_m\}$) من السماحية النسبية المعقدة لجليد البحر الكريستالي للسنة الأولى مقابل التردد لدرجة حرارة $T_{ice} -5^\circ\text{C}$.

الشكل 7

السماحية النسبية المعقدة لجليد البحر الكريستالي للسنة الأولى مقابل التردد
($h_{ice} = 0,2 m$ و $T_{ice} = -5^{\circ}C$)



(ب) السماحية النسبية المعقدة للجليد العمودي

فيما يتعلق بالجليد العمودي، حيث تكون جيوب المحلول الملحي عبارة عن إبر موجهة رأسياً، تكون السماحية النسبية المعقدة متباينة الخواص. ويتم الحصول على المكونات ϵ_{mx} و ϵ_{my} و ϵ_{mz} ، حيث يكون المحوران x و y موازيان لسطح الأرض، ويكون المحور z في عمودياً على سطح الأرض، من خلال:

$$(46) \quad \epsilon_{mx} = \epsilon_{my} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$(47) \quad \epsilon_{mz} = \epsilon_{ice} + v_b (\epsilon_b - \epsilon_{ice})$$

حيث:

$$(48a) \quad A = 1$$

$$(48b) \quad B = (1 - 2v_b)(\epsilon_b - \epsilon_{ice})$$

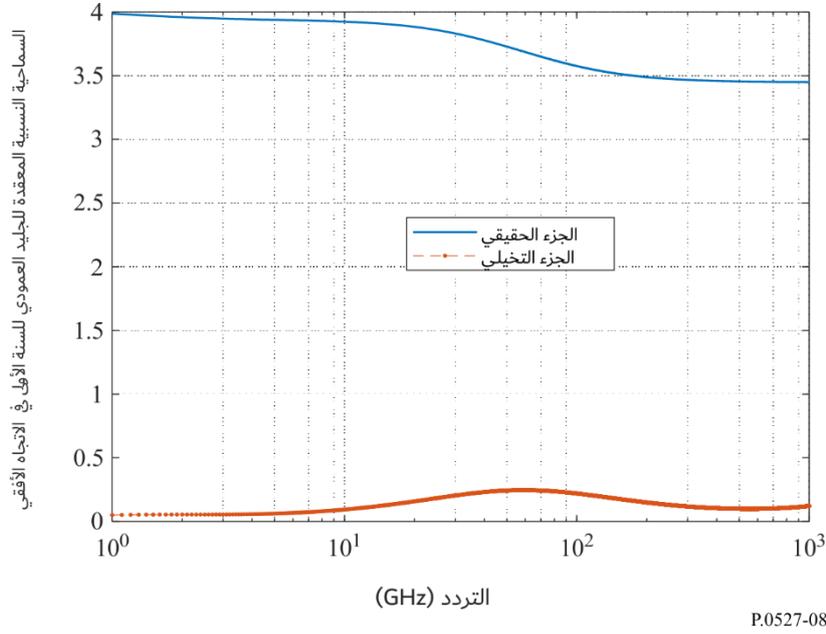
$$(48c) \quad C = -\epsilon_b \epsilon_{ice}$$

ويتم حساب ϵ_{ice} و ϵ_b و v_b عن طريق المعادلات (28) و (35) و (40) على التوالي.

ويوضح الشكل 8 الجزء الحقيقي ($Re\{\epsilon_{mx,y}\}$) والجزء التخيلي ($Im\{\epsilon_{mx,y}\}$) من السماحية النسبية المعقدة للجليد العمودي مقابل التردد عند درجة حرارة $T_{ice} = -5^{\circ}C$ في الاتجاهين الأفقيين (أي x و y)، ويوضح الشكل 9 الجزء الحقيقي ($Re\{\epsilon_{mz}\}$) والجزء التخيلي ($Im\{\epsilon_{mz}\}$) من السماحية النسبية المعقدة للجليد العمودي مقابل التردد $T_{ice} = -5^{\circ}C$ في الاتجاه الرأسي (أي z).

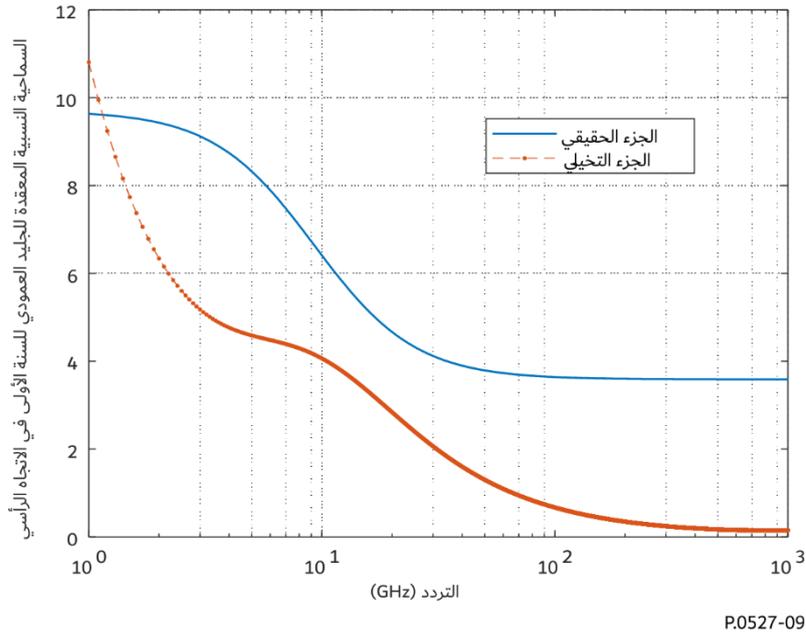
الشكل 8

السماحية النسبية المعقدة للجليد العمودي للسنة الأولى في الاتجاه الأفقي (y و x) مقابل التردد
 $(h_{ice} = 0,2 m و T_{ice} = -5^{\circ}C)$



الشكل 9

السماحية النسبية المعقدة للجليد العمودي للسنة الأولى في الاتجاه الرأسي (z) مقابل التردد
 $(h_{ice} = 0,2 m و T_{ice} = -5^{\circ}C)$



2.3.3.1.5 السماحية النسبية المعقدة للجليد متعدد السنوات

فيما يتعلق بالجليد متعدد السنوات الذي هو عبارة عن خليط من الجليد النقي والجيوب الهوائية الكروية، تكون السماحية النسبية المعقدة متناسخة ϵ_m وتعطى بالمعادلة:

$$(49) \quad \epsilon_m = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

حيث:

$$(50a) \quad A = 2$$

$$(50b) \quad B = 1 - 2\epsilon_{ice} - 3v_a(1 - \epsilon_{ice})$$

$$(50c) \quad C = -\epsilon_{ice}$$

إن ϵ_{ice} هي السماحية النسبية المعقدة للجليد النقي المعطاة بواسطة المعادلة (28)، و v_a هي كسر حجم الهواء.

إن طريقة التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة أعلاه قابلة للتطبيق في درجات حرارة $-30^\circ\text{C} \leq T \leq -2^\circ\text{C}$ وترددات تصل إلى 100 GHz.

4.1.5 الجليد

إن طرائق التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة في هذا القسم قابلة للتطبيق في درجات حرارة $-60^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C}$ وترددات تصل إلى 100 GHz.

1.4.1.5 الجليد الجاف

إن السماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف ϵ_{ds} هي:

$$(51) \quad \epsilon_{ds} = \epsilon'_{ds} - j\epsilon''_{ds}$$

حيث:

$$(52) \quad \epsilon'_{ds} = \begin{cases} 1 + 1.9\rho_{ds}, & \rho_{ds} \leq 0.5 \text{ g/cm}^3 \\ 0.51 + 2.88\rho_{ds}, & \rho_{ds} \geq 0.5 \text{ g/cm}^3 \end{cases}$$

$$(53) \quad \epsilon''_{ds} = 3\epsilon''_{ice} f_{ice} \frac{(\epsilon'_{ds})^2 (2\epsilon'_{ds} + 1)}{(\epsilon'_{ice} + 2\epsilon'_{ds}) [\epsilon'_{ice} + 2(\epsilon'_{ds})^2]}$$

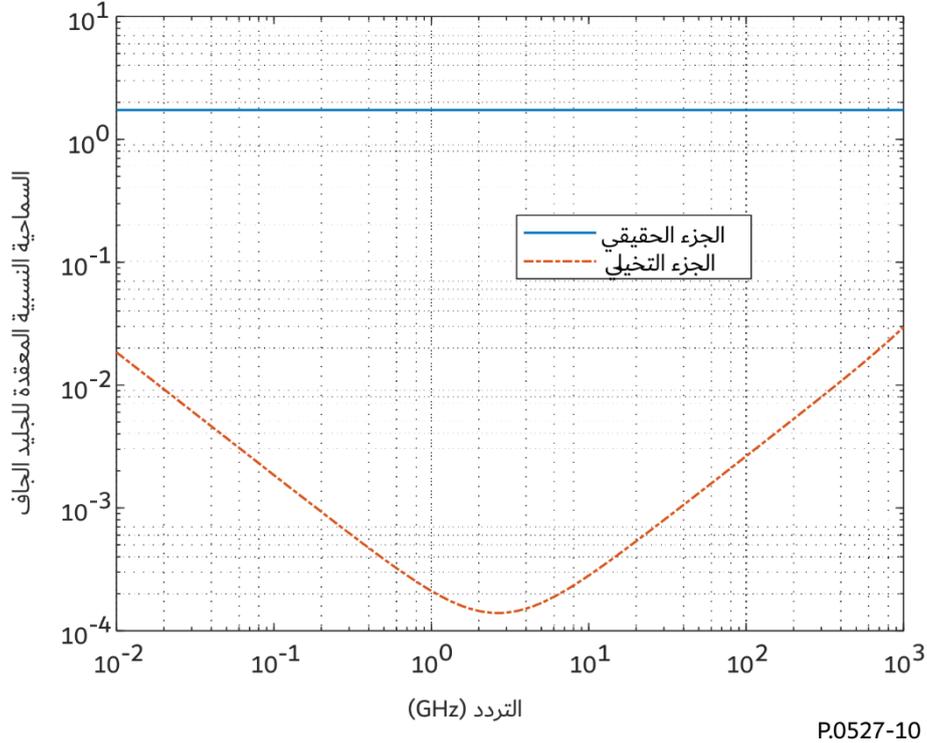
ρ_{ds} هي كثافة الثلج الجاف وتُحسب بوحدة g/cm^3 و $f_{ice} = \rho_{ds}/\rho_{ice}$ حيث $\rho_{ice} = 0,916 \text{ g/cm}^3$.

ويوضح الشكل 10 الجزء الحقيقي (ϵ'_{ds}) والجزء التخيلي (ϵ''_{ds}) من السماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف مقابل التردد بالنسبة

إلى $T_{ice} = -10^\circ\text{C}$ و $\rho_{ice} = 0,916 \text{ g/cm}^3$ و $\rho_{ds} = 0,4 \text{ g/cm}^3$.

الشكل 10

السماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف مقابل التردد
 ($T_{ice} = -10^{\circ}\text{C}$ و $\rho_{ice} = 0,916 \text{ g/cm}^3$ و $\rho_{ds} = 0,4 \text{ g/cm}^3$)



2.4.1.5 الجليد الرطب

إن الجليد الرطب هو مزيج من الثلج الجاف والماء النقي، وتكون السماحية النسبية المعقدة للجليد الرطب ϵ_{ws} كالتالي:

$$(54) \quad \epsilon_{ws} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

حيث:

$$(55a) \quad A = 2$$

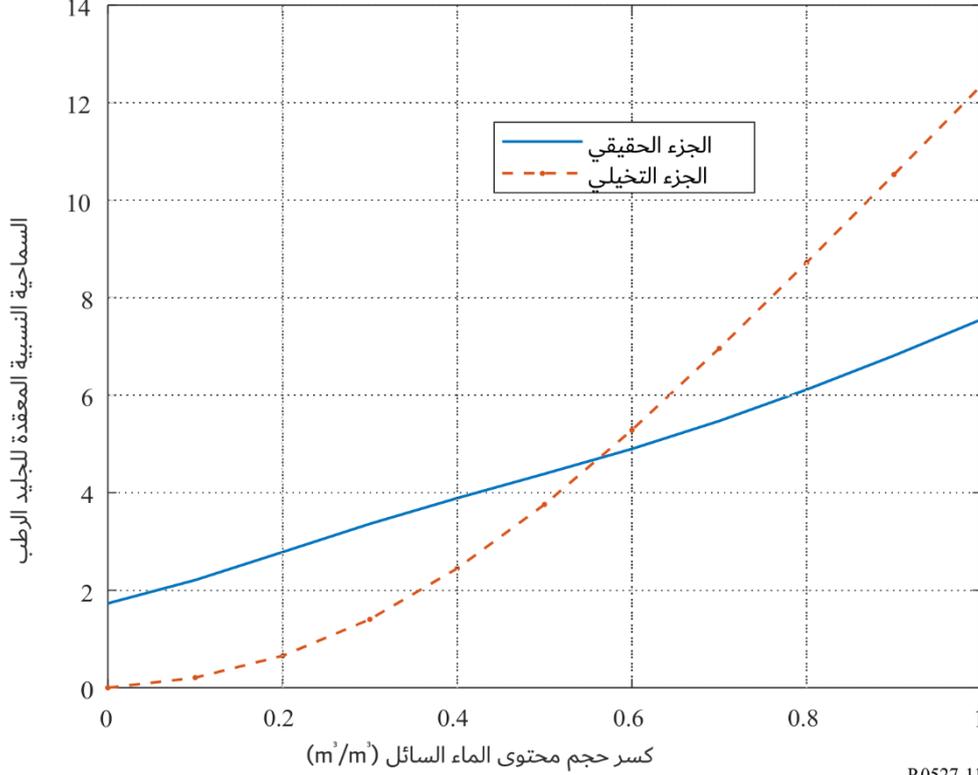
$$(55b) \quad B = \epsilon_{pw} - 2\epsilon_{ds} - 3F_{wc}(\epsilon_{pw} - \epsilon_{ds})$$

$$(55c) \quad C = -\epsilon_{pw}\epsilon_{ds}$$

حيث F_{wc} هو كسر حجم الماء السائل (m^3/m^3)؛ ϵ_{ice} و ϵ_{pw} هما السماحيتان النسبيتان المعقدتان للمياه النقية والثلج الجاف من المعادلتين (5) و (51) على التوالي. ويوضح الشكل 11 الجزء الحقيقي ($Re\{\epsilon_{ws}\}$) والجزء التخيلي ($Im\{\epsilon_{ws}\}$) من السماحية النسبية المعقدة للجليد الرطب مقابل كسر حجم الماء السائل بالنسبة إلى $f_{\text{GHz}} = 60 \text{ GHz}$ و $T = 0^{\circ}\text{C}$.

الشكل 11

السماحية النسبية المعقدة للرطب مقابل كسر حجم محتوى الماء السائل
($T = 0^\circ\text{C}$ و $f_{\text{GHz}} = 60 \text{ GHz}$)



P.0527-11

5.1.5 رغاوي البحر

تتكون رغاوي البحر، الناتجة عن احتياج مياه البحر عن طريق تكسير الأمواج المجاورة للشاطئ، من مياه البحر وفقاعات الهواء المحبوسة. وتكون السماحية النسبية المعقدة لرغاوي البحر ϵ_f كالتالي:

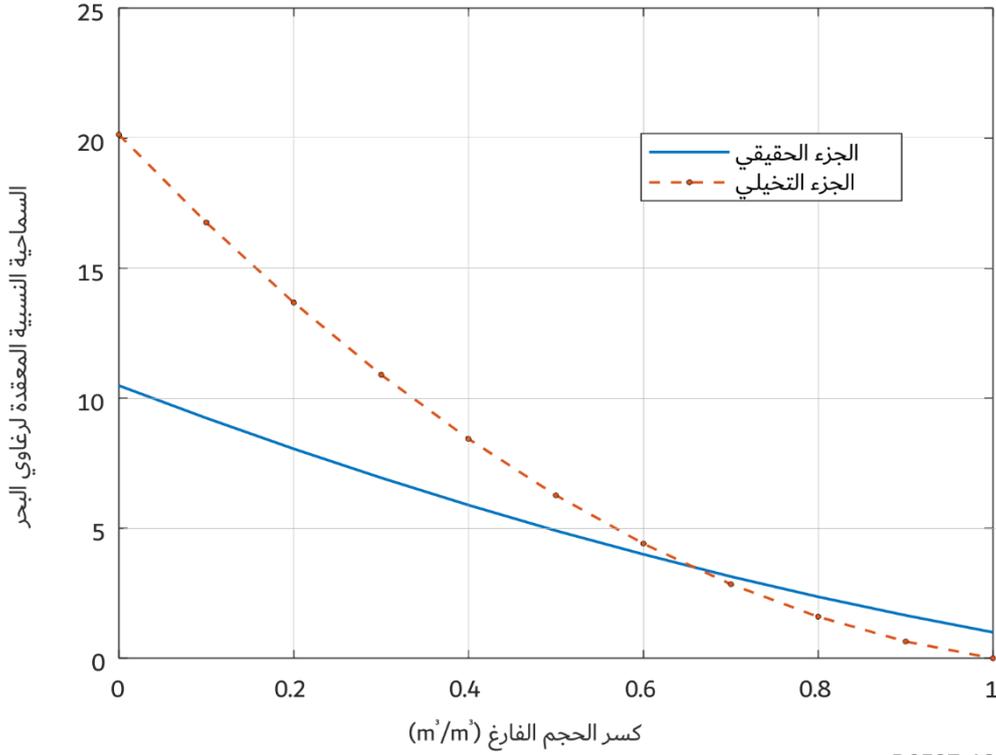
$$(56) \quad \epsilon_f = (f_a + (1 - f_a) \sqrt{\epsilon_{sw}})^2$$

حيث f_a ($0 \leq f_a \leq 1$) هي كسر الحجم الفارغ، و ϵ_{sw} هي السماحية النسبية المعقدة لمياه البحر من المعادلة (14). ويبلغ كسر الحجم الفارغ (m^3/m^3)، نسبة حجم فقاعات الهواء بالنسبة إلى الحجم الإجمالي، القيمة القصوى عند واجهة الرغوة الهوائية والقيمة الدنيا عند واجهة مياه البحر الرغوية. وطريقة التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة في المعادلة (56) قابلة للتطبيق في درجات حرارة تبلغ $-4^\circ\text{C} \leq T \leq 40^\circ\text{C}$ وترددات تصل إلى 100 GHz.

ويوضح الشكل 12 الجزء الحقيقي ($Re\{\epsilon_f\}$) والجزء التخيلي ($Im\{\epsilon_f\}$) من السماحية النسبية المعقدة لرغاوي البحر مقابل كسر الحجم الفارغ بالنسبة إلى $f_{\text{GHz}} = 60 \text{ GHz}$ و $S = 35 \text{ ppt}$ و $T = 20^\circ\text{C}$.

الشكل 12

السماحية النسبية المعقدة لرغاوي البحر مقابل كسر الحجم الفارغ
($T = 20^\circ\text{C}$ و $S = 35 \text{ ppt}$ و $f_{\text{GHz}} = 60 \text{ GHz}$)



P.0527-12

2.5 التربة

إن السماحية النسبية المعقدة للتربة، ϵ_{soil} ، هي دالة للتردد، f_{GHz} ، ودرجة الحرارة، T ($^\circ\text{C}$)، وتكوين التربة، ومحتوى المياه الحجمي.

ويتميز تكوين التربة بالنسب المئوية لحجم مكونات التربة الجافة التالية التي تتوفر من الاستطلاعات الميدانية والتحليل المختبري:
(أ) P_{sand} (% من الرمل، ب) P_{clay} (% من الطين، ج) P_{silt} (% من الطمي).

ويتميز تكوين التربة كذلك: (أ) بالجاذبية النوعية (أي كثافة كتلة التربة مقسومة على كثافة الكتلة المائية) للخليط الجاف لمكونات التربة، ρ_s (g/cm^3)، (ب) ومحتوى الماء الحجمي، m_v ، (أي حجم الماء مقسوماً على إجمالي حجم التربة في عينة تربة معينة (m^3/m^3))، (ج) والكثافة الإجمالية ρ_b (g/cm^3) (أي كتلة التربة في حجم معين من التربة). وإذ يتعذر القياس المباشر للكثافة الإجمالية للتربة ρ_b بسهولة، يمكن اشتقاقها من النسب المئوية لمكونات الجافة. وفي حال عدم تيسر دالة شبه النقل المحلية، يمكن استخدام دالة شبه النقل التجريبية التالية:

$$(57) \quad \rho_b = 1.07256 + 0.078886 \ln(P_{sand}) + 0.038753 \ln(P_{clay}) + 0.032732 \ln(P_{silt})$$

وفي حال كانت النسبة المئوية للمؤوية لأي مكون أقل من 1%، ينبغي حذف الحد المقابل في المعادلة (57). وينبغي أن يبلغ مجموع النسب المؤوية المكونة للحدود المضمنة 100%.

ويمكن الحصول على درجة حرارة التربة ومحتوى الماء الحجمي من الخرائط العالمية التي توفرها أنظمة الاستشعار عن بعد المحمولة في الفضاء، ويمكن الحصول على نسيج التربة من قواعد البيانات الجيولوجية مثل قاعدة بيانات التربة العالمية المنسقة، الإصدار 1.21 "HWSD1.21" والنظام العالمي لاستيعاب بيانات الأرض "GLDAS". ويمكن استخدام الجدول 2 في حالة عدم وجود بيانات محلية. ويبين الجدول 2 النسب المثوية المكونة النمطية، والجاذبية النوعية، والكثافات الإجمالية لأربعة أنواع من التربة ذات الصفة التمثيلية.

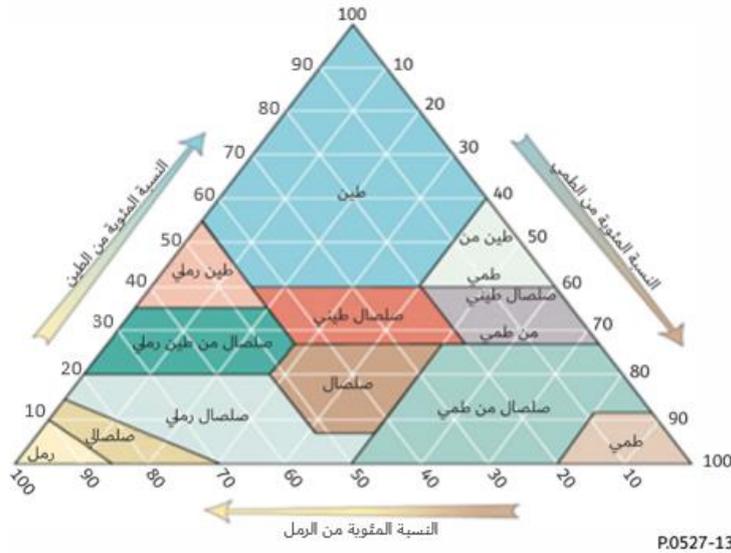
الجدول 2

المعلومات الفيزيائية لمختلف أنواع التربة

4	3	2	1	صنف قوام تسمية التربة
طين من طمي	صلصال من طمي	صلصال	صلصال رملي	
5,02	30,63	41,96	51,52	% من الرمل
47,38	13,48	8,53	13,42	% من الطين
47,60	55,89	49,51	35,06	% من الطمي
2,56	2,59	2,70	2,66	ρ_s
1,4758	1,5750	1,5781	1,6006	$(g\ cm^{-3})\rho_b$

الشكل 13

مثلث قوام التربة



يستند صنف قوام تسمية التربة الوارد في الصف الأول من الجدول 2 إلى مثلث قوام التربة المبين في الشكل 13.

ويعتبر أسلوب التنبؤ هذا التربة أنها خليط من أربعة مكونات: أ) جزيئات التربة المكونة من مزيج من الطين والرمل والطيني، ب) الهواء، ج) الماء المقيد (الماء المرتبط بجزيئات التربة بواسطة قوى مثل توتر السطح، حيث لا يُعرف سُمك طبقة الماء وثابت عازلها وترددات استرخائها)، د) الماء الحر (المعروف أيضاً بالماء السائب الذي يتدفق بحرية ضمن ثقب التربة). والسماحية النسبية المعقدة لتربة، ϵ_{soil} ، قوامها هذا الخليط ذو المكونات الأربعة، هي

$$(58) \quad \epsilon_{soil} = \epsilon'_{soil} - j\epsilon''_{soil}$$

حيث:

$$(59) \quad \varepsilon'_{soil} = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\{\varepsilon'_{sm}\}^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} (\varepsilon'_{fw})^\alpha - m_v \right]^{1/\alpha}$$

$$(60) \quad \varepsilon''_{soil} = \left[m_v^{\beta''} (\varepsilon''_{fw})^\alpha \right]^{1/\alpha}$$

$$(61) \quad \varepsilon'_{sm} = (1.01 + 0.44 \rho_s)^2 - 0.062$$

$$(62) \quad \beta' = 1.2748 - 0.00519 P_{sand} - 0.00152 P_{clay}$$

$$(63) \quad \beta'' = 1.33797 - 0.00603 P_{sand} - 0.00166 P_{clay}$$

و

$$(64) \quad \alpha = 0.65$$

و ε'_{fw} و ε''_{fw} هما الجزآن الحقيقي والتخيلي من السماحية النسبية المعقدة للماء الحر:

$$(65) \quad \varepsilon'_{fw} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_1}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \varepsilon_\infty + \frac{18 \sigma'_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v}$$

$$(66) \quad \varepsilon''_{fw} = \frac{(f_{GHz}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \frac{18 \sigma''_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v}$$

وحيث تحسّل قيم ε_s و ε_1 و ε_∞ و f_1 و f_2 من المعادلات (8) و (9) و (10) و (12) و (13). وتعطى σ'_{eff} و σ''_{eff} بواسطة:

$$(67) \quad \sigma'_{eff} = (f_{GHz}/1.35) \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1.35)^2} \right)$$

$$(68) \quad \sigma''_{eff} = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1.35)^2}$$

و

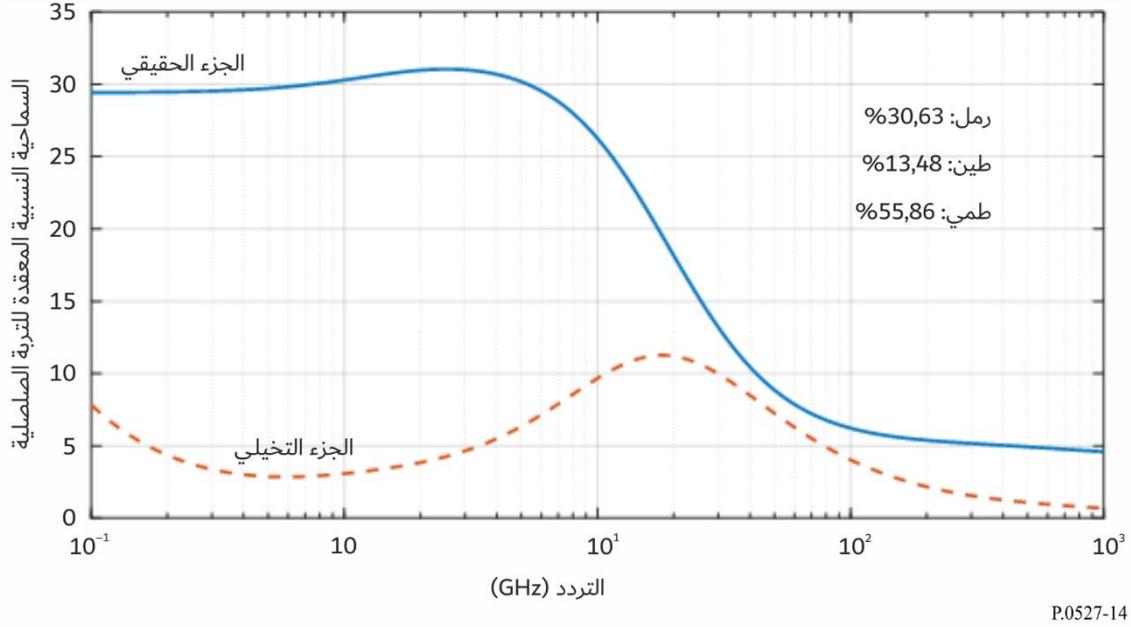
$$(69) \quad \sigma_1 = 0.0467 + 0.2204 \rho_b - 0.004111 P_{sand} - 0.006614 P_{clay}$$

$$(70) \quad \sigma_2 = -1.645 + 1.939 \rho_b - 0.0225622 P_{sand} + 0.01594 P_{clay}$$

وتظهر السماحية النسبية المعقدة لنمطين من أنواع التربة في الأشكال 14 و 15 و 16. وتتشابه تركيبة التربة في الشكلين 14 و 16 فيما عدا محتوى الماء الحجمي، مما يشير إلى أن الجزء الحقيقي والجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة يرتبطان مباشرة بالمحتوى المائي الحجمي.

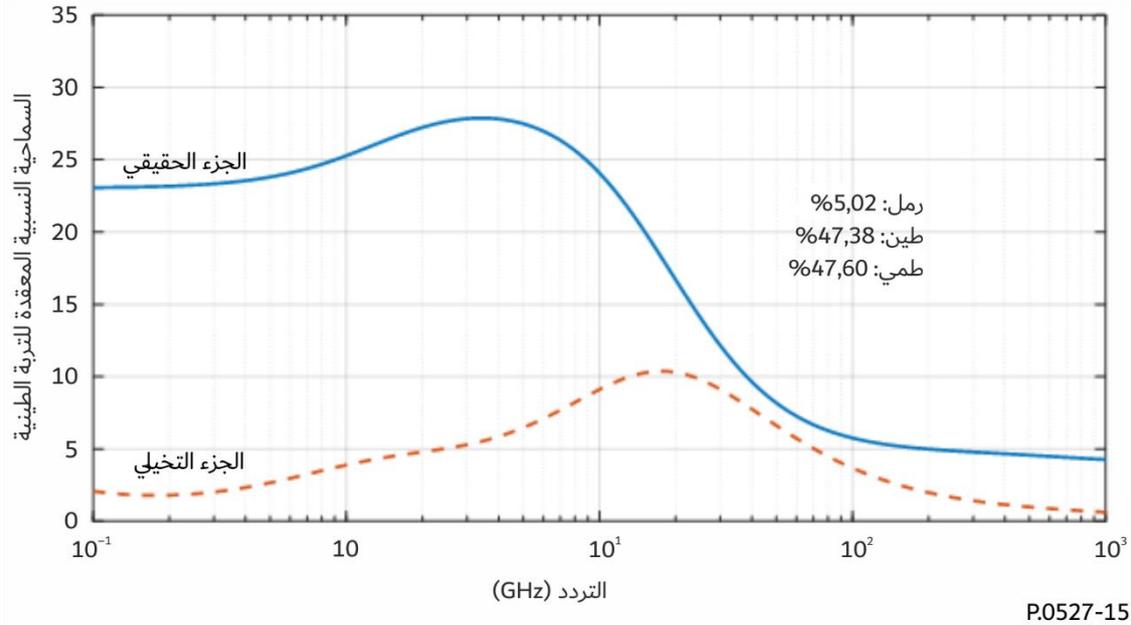
الشكل 14

السماحية النسبية المعقدة لتربة صلصالية من الطمي تبعاً للتردد
 ($m_v = 0,5, T = 23\text{ }^\circ\text{C}, \rho_s = 2,59, \rho_b = 1,5750\text{ g cm}^{-3}$)



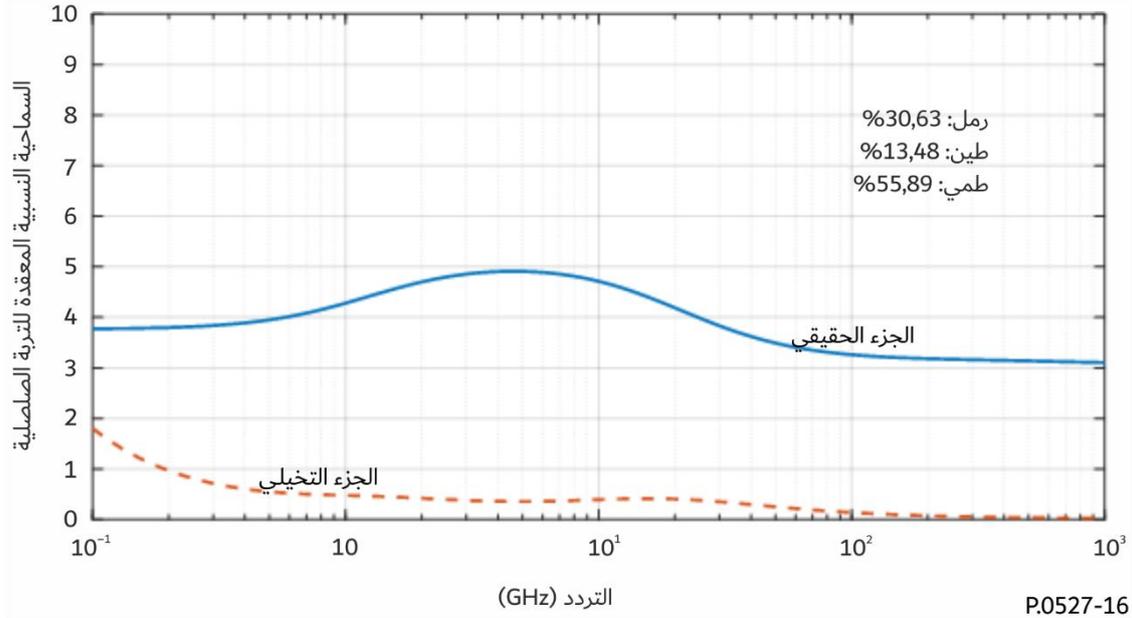
الشكل 15

السماحية النسبية المعقدة لتربة طينية من الطمي تبعاً للتردد
 ($m_v = 0,5, T = 23\text{ }^\circ\text{C}, \rho_s = 2,56, \rho_b = 1,4758\text{ g cm}^{-3}$)



الشكل 16

السماحية النسبية المعقدة لتربة صلصلية من الطمي تبعاً للتردد
 $(m_v = 0,07, T = 23 \text{ }^\circ\text{C}, \rho_s = 2,59, \rho_b = 1,5750 \text{ g cm}^{-3})$



3.5 الغطاء النباتي

السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي هي دالة للتردد f_{GHz} (GHz)، ودرجة الحرارة T ($^\circ\text{C}$)، ومحتوى الماء المقيس بالجاذبية للغطاء النباتي، M_g ، الذي يعرّف بأنه

$$(71) \quad M_g = \frac{M_{mv} - M_{dv}}{M_{mv}}$$

M_{mv} هو وزن الغطاء النباتي الرطب، و M_{dv} هو وزن الغطاء النباتي الجاف. ويتراوح M_g بين 0,0 و 0,7.

ويعتبر أسلوب التنبؤ هذا الغطاء النباتي مزيجاً من الغطاء النباتي الإجمالي، والمياه الخالية من الملوحة، والمياه المقيدة، والجليد (إن وجد). وتعطى السماحية النسبية المعقدة لهذا الخليط بواسطة

$$(72) \quad \varepsilon_v = \varepsilon'_v - j \varepsilon''_v$$

ويرد في الفقرة 1.3.5 الجزء الحقيقي، ε'_v ، والجزء التخيلي، ε''_v ، من السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي بالنسبة إلى درجات حرارة أعلى من درجة التجمد، وفي الفقرة 2.3.5 يرد هذان الجزآن بالنسبة إلى درجات حرارة أقل من درجة التجمد.

1.3.5 درجات حرارة أعلى من درجة التجمد

في درجات حرارة أعلى من درجة التجمد ($0 < T < ^\circ\text{C}$)، الجزآن الحقيقي والتخيلي من السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي هما:

$$(73) \quad \varepsilon'_v = \varepsilon_{dv} + v_{fw} \left[\varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} \right] + v_{bw} \left[2.9 + \frac{55[1 + \sqrt{(f_{\text{GHz}}/0.02f_1)}]}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0.02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0.01f_1)} \right]$$

$$(74) \quad \varepsilon''_v = v_{fw} \left[\frac{(f_{\text{GHz}}/f_1)(\varepsilon_s - \varepsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_2)(\varepsilon_1 - \varepsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} + \frac{22.86}{f_{\text{GHz}}} \right] + v_{bw} \left[\frac{55\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0.02f_1)}}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0.02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0.01f_1)} \right]$$

حيث ϵ_{dv} هو الجزء الحقيقي من السماحية النسبية للغطاء النباتي الإجمالي، و v_{fw} هو كسر حجم الماء الحر، و v_{bw} هو كسر حجم الماء المقيد بالإضافة إلى ما يلي:

$$(75) \quad \epsilon_{dv} = 1.7 - 0.74 M_g + 6.16 M_g^2$$

$$(76) \quad v_{fw} = M_g(0.55 M_g - 0.076)$$

$$(77) \quad v_{bw} = 4.64 M_g^2 / (1 + 7.36 M_g^2)$$

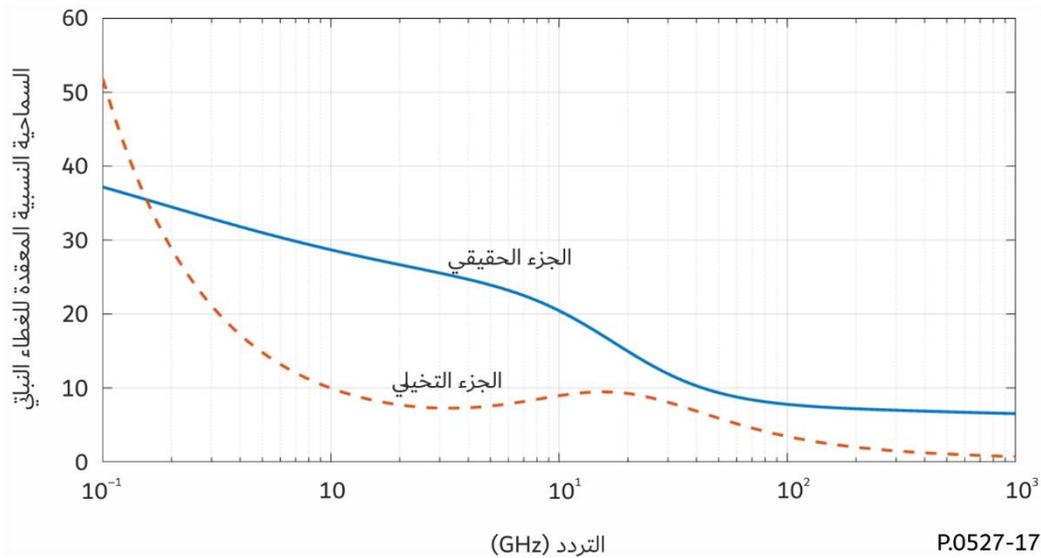
وتحصّل قيم ϵ_s و ϵ_1 و ϵ_∞ و f_1 و f_2 من المعادلات (8) و (9) و (10) و (12) و (13) على التوالي.

والمعادلتان (73) و (74) أعم من المعادلة (16) في التوصية ITU-R P.833 لأنهما تحتسبان الماء الحر والمقيد معاً وتشملان الاعتماد على درجة الحرارة.

ويظهر في الشكلين 10 و 11 الجزآن الحقيقي والتخيلي من السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي مقابل التردد عند قيمتين مختلفتين لمحتوى الماء المقيس بالجاذبية، مما يبين أن الجزء الحقيقي والجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي يزدادان بزيادة محتوى الماء المقيس بالجاذبية.

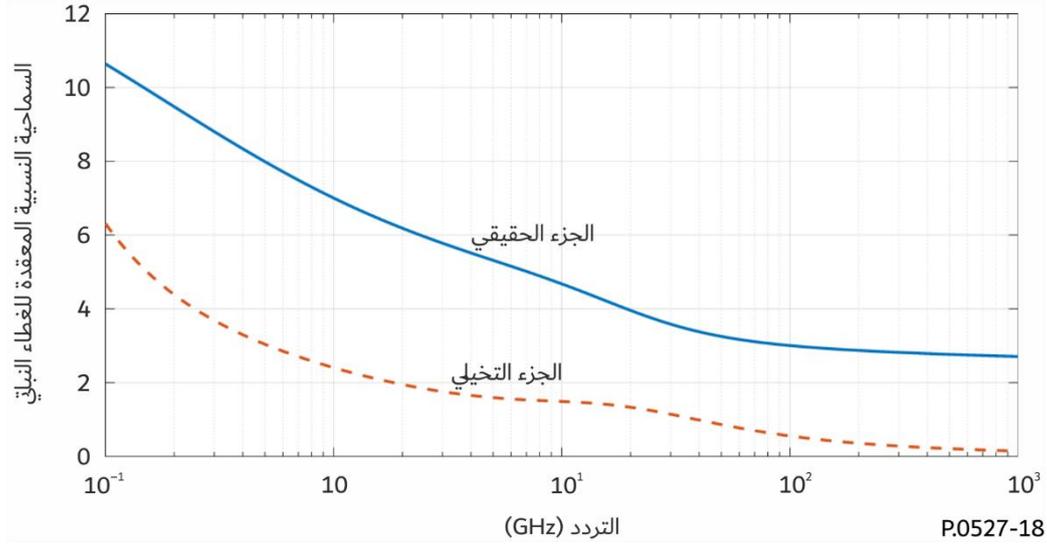
الشكل 17

السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي تبعاً للتردد
($M_g = 0,68, T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$)



الشكل 18

السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي تبعاً للتردد
($M_g = 0,26, T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$)



2.3.5 درجات حرارة أقل من درجة التجمد

في درجات حرارة أقل من درجة التجمد ($-20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T < 0 \text{ }^\circ\text{C}$)، الجزآن الحقيقي والتخيلي من السماحية النسبية المعقدة هما:

$$(78) \quad \epsilon'_v = \epsilon_{dv} + v_{fw} \left[4.9 + \frac{82.2}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} \right] + v_{bw} [8.092 + 14.2067 X1] + 3.15 v_{ice}$$

$$(79) \quad \epsilon''_v = v_{fw} \left[\frac{82.2(f_{\text{GHz}}/9)}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} + \frac{11.394}{f_{\text{GHz}}} \right] + 14.2067 v_{bw} Y1$$

حيث:

$$(80) \quad \epsilon_{dv} = 6.76 - 10.24 M_g + 6.19 M_g^2$$

$$(81) \quad v_{fw} = (-0.106 + 0.6591 M_g - 0.610 M_g^2) \exp \left((0.06 + 0.6883 M_g + 0.0001 M_g^2) \Delta \right)$$

$$(82) \quad v_{bw} = (-0.16 + 1.1876 M_g - 0.387 M_g^2) \exp \left((0.721 - 1.2733 M_g + 0.8139 M_g^2) \Delta \right)$$

$$(83) \quad v_{ice} = A_{ice} \Delta^2 + B_{ice} \Delta + C_{ice}$$

$$(84) \quad A_{ice} = 0.001 - 0.012 M_g + 0.0082 M_g^2$$

$$(85) \quad B_{ice} = 0.036 - 0.2389 M_g + 0.1435 M_g^2$$

$$(86) \quad C_{ice} = -0.0538 + 0.4616 M_g - 0.3398 M_g^2$$

$$(87) \quad X1 = \frac{1 + (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.2054} \cos(0.2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.2054} \cos(0.2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.4108}}$$

$$(88) \quad Y1 = \frac{(f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.2054} \sin(0.2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.2054} \cos(0.2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.4108}}$$

$$(89) \quad \Delta = T - T_f$$

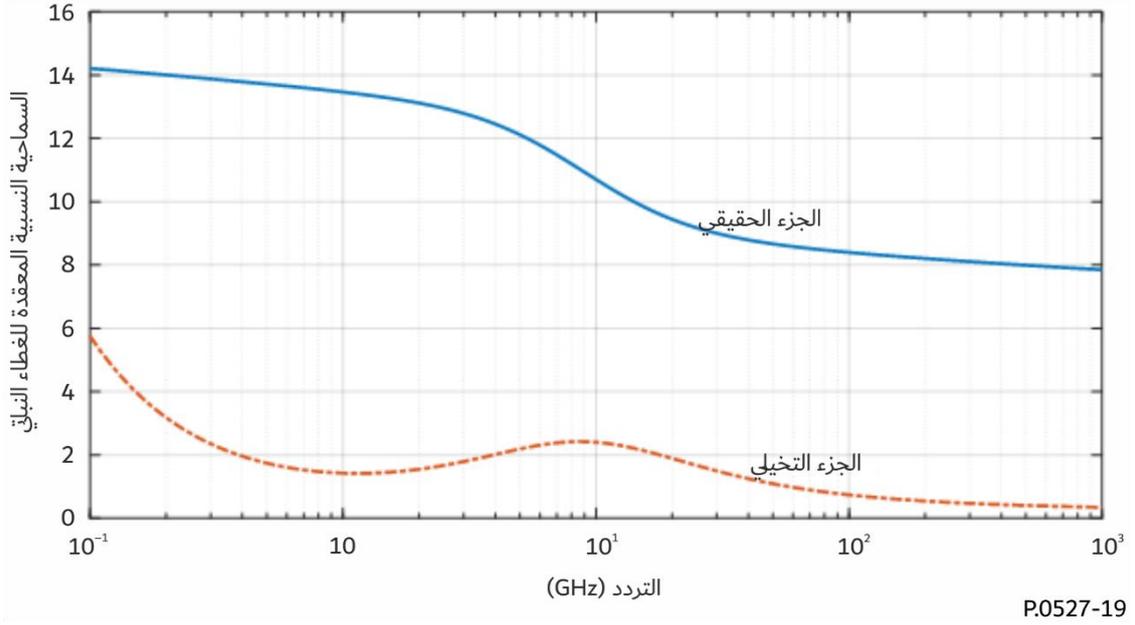
ودرجة حرارة التجمد للغطاء النباتي، T_f ، هي -6,5 درجة مئوية.

ويبين الشكلان 19 و20 الجزآن الحقيقي والتخيلي من السماحية النسبية المعقدة مقابل التردد ودرجة الحرارة. ويوضح هذان الشكلان أن خفض درجة الحرارة إلى ما دون درجة التجمد يؤدي إلى خفض الجزآن الحقيقي والتخيلي من السماحية النسبية المعقدة للغطاء

النباتي، ويقلل من اعتماد تلك المعلمات على التردد. وفي الترددات فوق 20 GHz، تصبح السماحية النسبية المعقدة أقل اعتماداً على درجة الحرارة.

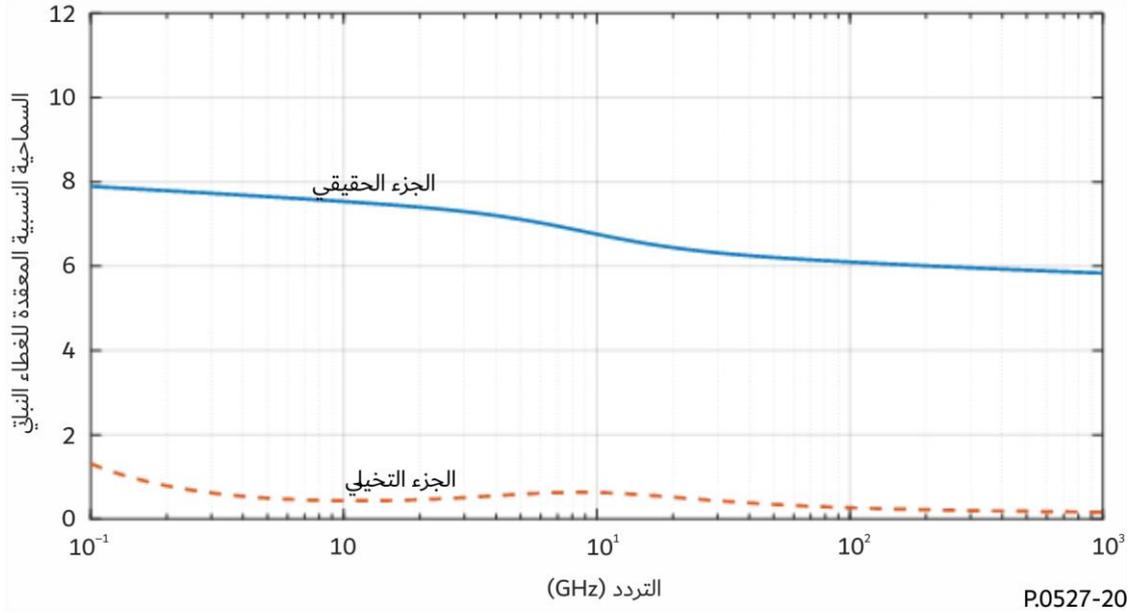
الشكل 19

السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي تبعاً للتردد
($M_g = 0,68, T = -7\text{ °C}$)



الشكل 20

السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي تبعاً للتردد
($M_g = 0,68, T = -10\text{ °C}$)



6 الانبعاثية

تعرف الانبعاثية، ϵ ، على أنها نسبة الطاقة المشعة من سطح مادة ما إلى الطاقة المشعة من باعث مثالي هو الجسم الأسود في نفس درجة الحرارة ونفس التردد ونفس ظروف النظر. وترتبط الانبعاثية والانعكاسية، ρ ، في نفس التردد بالحفاظ على الطاقة؛ أي $\epsilon + \rho = 1$. وترتبط انبعاثية سطح معين بسماحيته النسبية المعقدة، ϵ ، من خلال معادلات فرينيل:

$$(90) \quad \epsilon = 1 - |r_p|^2, \quad p = v, h, c$$

حيث:

$$(91) \quad r_v = \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}$$

$$(92) \quad r_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}$$

$$(93) \quad r_c = \frac{r_v + r_h}{2}$$

وتستخدم اللاحقة السفلية h في المكون المستقطب أفقياً واللاحقة السفلية v في المكون المستقطب رأسياً واللاحقة السفلية c في الاستقطاب الدائري. و θ هي الزاوية بين الموجة الواردة والعمودي على السطح (أي $\theta = 0^\circ$ بالنسبة للعمودي على السطح). وبالنسبة للحالة الخاصة للعمود على السطح،

$$(94) \quad r_v = \frac{\epsilon - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \sqrt{\epsilon}}$$

$$(95) \quad r_h = \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}}$$

حيث:

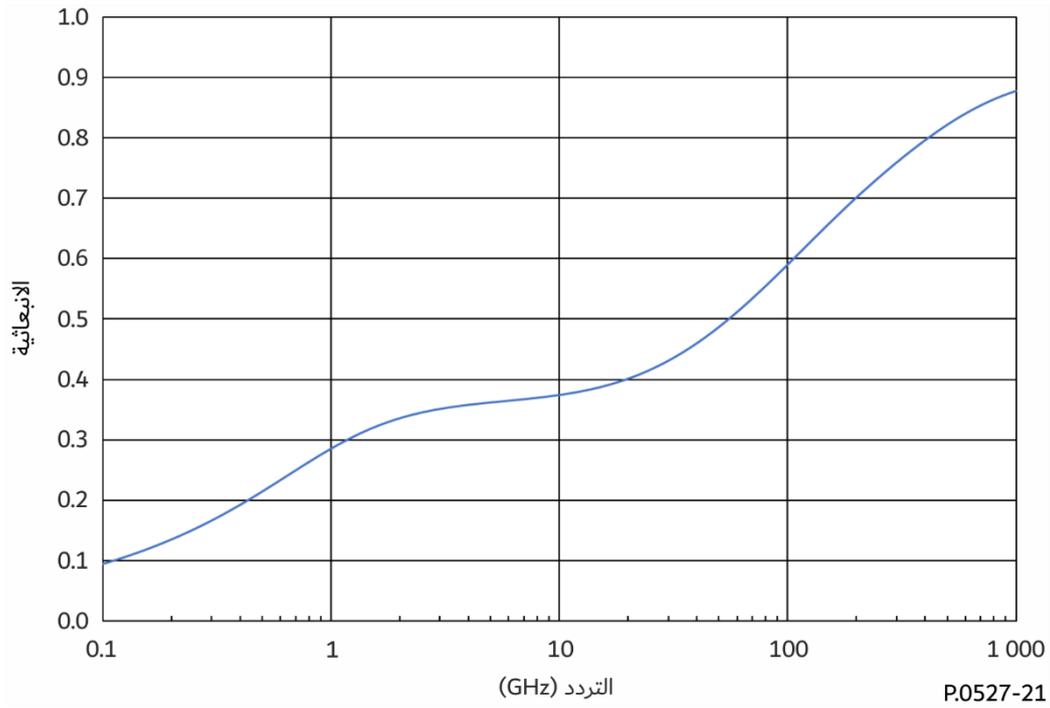
$$(96) \quad r_v = \frac{\epsilon - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \sqrt{\epsilon}} = -\frac{\sqrt{\epsilon}}{\epsilon} \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} = -\frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} = -r_h$$

وبالتالي فإن: $r_c = 0$ و $\epsilon = 1$.

وبالنسبة للعمودي على السطح والمكونين المستقطبين رأسياً وأفقياً، يبين الشكل 21 انبعاثية مياه البحر لسطح محيط مرآوي أملس ومستوى المقابلة للظروف المبينة في الشكل 2 (أي $T = 20^\circ \text{C}$ و $S = 35 \text{ ppt}$)؛ ويبين الشكل 22 انبعاثية تربة طينية من الطمي وفقاً للظروف المبينة في الشكل 15 (أي $P_{sand} = 5,02\%$ و $P_{clay} = 47,38\%$ و $P_{silt} = 47,60\%$ و $m_v = 0,5$ و $T = 23^\circ \text{C}$ و $\rho_s = 2,56$ و $\rho_b = 1,4758 \text{ g/cm}^3$)؛ ويبين الشكل 23 انبعاثية الغطاء النباتي المقابلة للظروف المبينة في الشكل 18 (أي $T = 22^\circ \text{C}$ و $M_g = 0,26$).

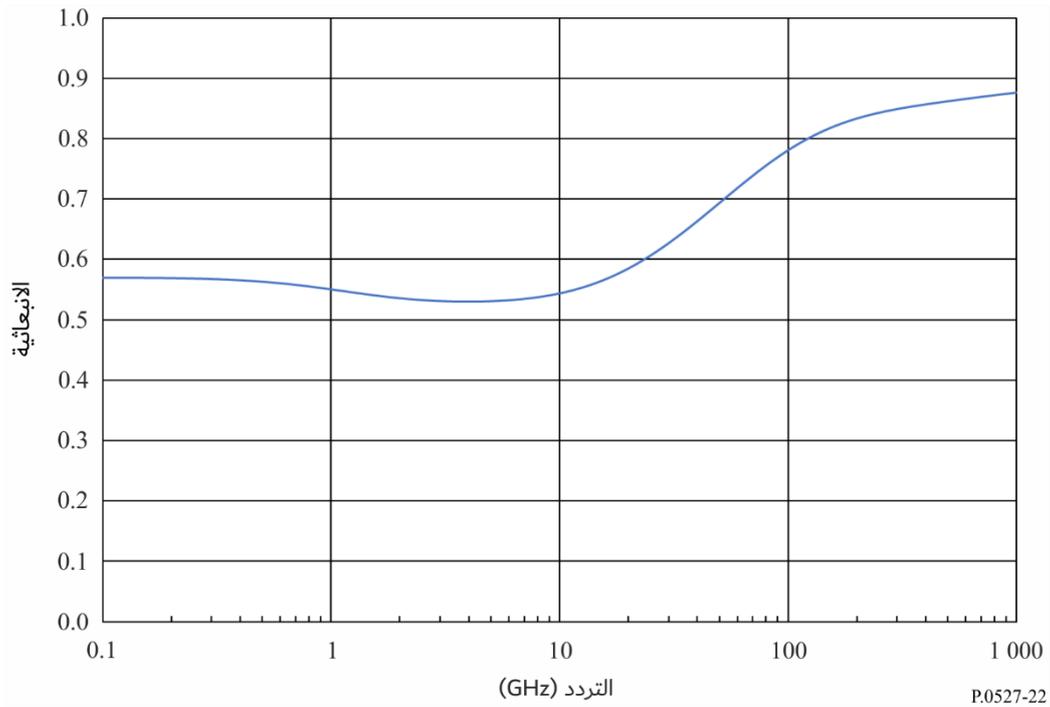
الشكل 21

انبعاثية مياه البحر لسطح بحر أملس تماماً ($S = 35 \text{ ppt}$ و $T = 20 \text{ °C}$)

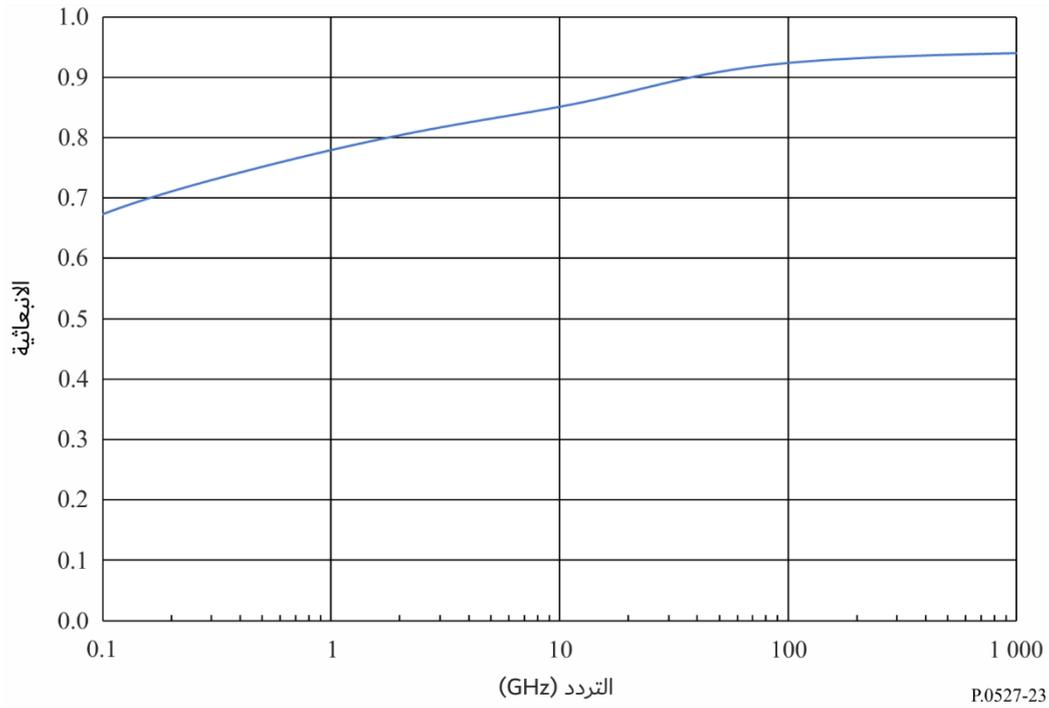


الشكل 22

انبعاثية تربة طينية من الطمي ($m_v = 0,5$, $T = 23 \text{ °C}$, $\rho_s = 2,56$, $\rho_b = 1,4758 \text{ g/cm}^3$)



الشكل 23

انبعاثية الغطاء النباتي ($M_g = 0,26, T = 22\text{ °C}$)

7 الانبعاثية المتاحة للمحيط

الانبعاثية المتاحة للمحيط، ϵ_{ocean} ، هي دالة للاستقطاب والتردد وزاوية الورود وسرعة الرياح ودرجة الحرارة والملوحة ويمكن تقريبها جيداً من خلال المعادلة التالية:

$$\epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S) = \epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta, T, S) + \Delta \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S)$$

حيث $\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta, T, S)$ هي الانبعاثية، ϵ ، المذكورة في الفقرة 6 باستخدام السماحية المعقدة لمياه البحر، ϵ_{sw} ، المذكورة في الفقرة 2.1.5؛ و $\Delta \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S)$ هي الانبعاثية المتاحة المتزايدة كدالة لسرعة الرياح. والمعلومات هي:

p : الاستقطاب (v = رأسي؛ h = أفقي)

f_{GHz} : التردد (GHz)

θ : زاوية الورود

W : سرعة الرياح (m/s)

T : درجة حرارة سطح المحيط ($^{\circ}\text{C}$)

S : الملوحة (ppt).

$$\Delta \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S) = \widehat{\Delta} \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}} \right)^{x_p} + \frac{1}{2} \left[\widehat{\Delta} \epsilon_{ocean}(v, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) + \widehat{\Delta} \epsilon_{ocean}(h, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) \right] \times \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_{ref}} \right)^{x_p} \right]$$

حيث $x_h = 1,5$ ، $x_v = 4,0$

$$\widehat{\Delta} \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) = \delta_{ref}(p, f_{GHz}, W) \frac{\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, T, S)}{\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, T_{ref}, S)}$$

حيث $\theta_{ref} = 55,2^\circ$ ، $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$ ،

$$(99) \quad \delta_{ref}(p, f_{GHz}, W) = \sum_{k=1}^5 \delta_k(p, f_{GHz}) W^k$$

وترد المعاملات $\delta_k(p, f_{GHz})$ في الجدول 3.

هذا النموذج صالح في الترددات من 6,8 إلى 85,5 GHz ولزوايا ورود على سطح الأرض بين 0 و 65 درجة (أي لزوايا ارتفاع بين 25 و 90 درجة). وبالنسبة لسرعات الرياح التي تفوق 20 m/s (أي 72 km/h)، ينبغي حساب الانبعائية من خلال استكمال خارجي خطي للانبعائية في سرعة رياح تبلغ 20 m/s. ويمكن حساب الانبعائيات في ترددات بين الترددات الواردة في الجدول 3 من خلال استكمال داخلي خطي للانبعائية بين الترددات الواردة في الجدول 3.

الجدول 3

المعاملات $\delta_k(p, f_{GHz})$

δ_5	δ_4	δ_3	δ_2	δ_1	p	f_{GHz} (GHz)
4,88803E-08	-2,86408E-06	5,60506E-05	-3,03363E-04	4,96726E-05	v	6,8
1,20306E-08	-1,50552E-06	4,89469E-05	-5,10844E-04	3,85750E-03	h	6,8
4,89421E-08	-2,94364E-06	5,73583E-05	-2,76866E-04	-2,35464E-04	v	10,7
2,80155E-08	-2,47982E-06	6,82607E-05	-6,20751E-04	4,17650E-03	h	10,7
5,81231E-08	-3,40705E-06	6,62807E-05	-3,65935E-04	3,26502E-05	v	18,7
4,01950E-08	-3,28225E-06	8,54446E-05	-7,41324E-04	5,06330E-03	h	18,7
2,76830E-08	-1,84769E-06	4,00659E-05	-2,17673E-04	-7,03594E-04	v	37,0
6,67315E-08	-4,61253E-06	1,06734E-04	-8,43744E-04	5,63832E-03	h	37,0
-1,67503E-08	1,26520E-06	-3,33273E-05	4,06967E-04	-3,14175E-03	v	85,5
1,35737E-07	-7,27339E-06	1,26075E-04	-7,00158E-04	6,01311E-03	h	85,5

المرفق

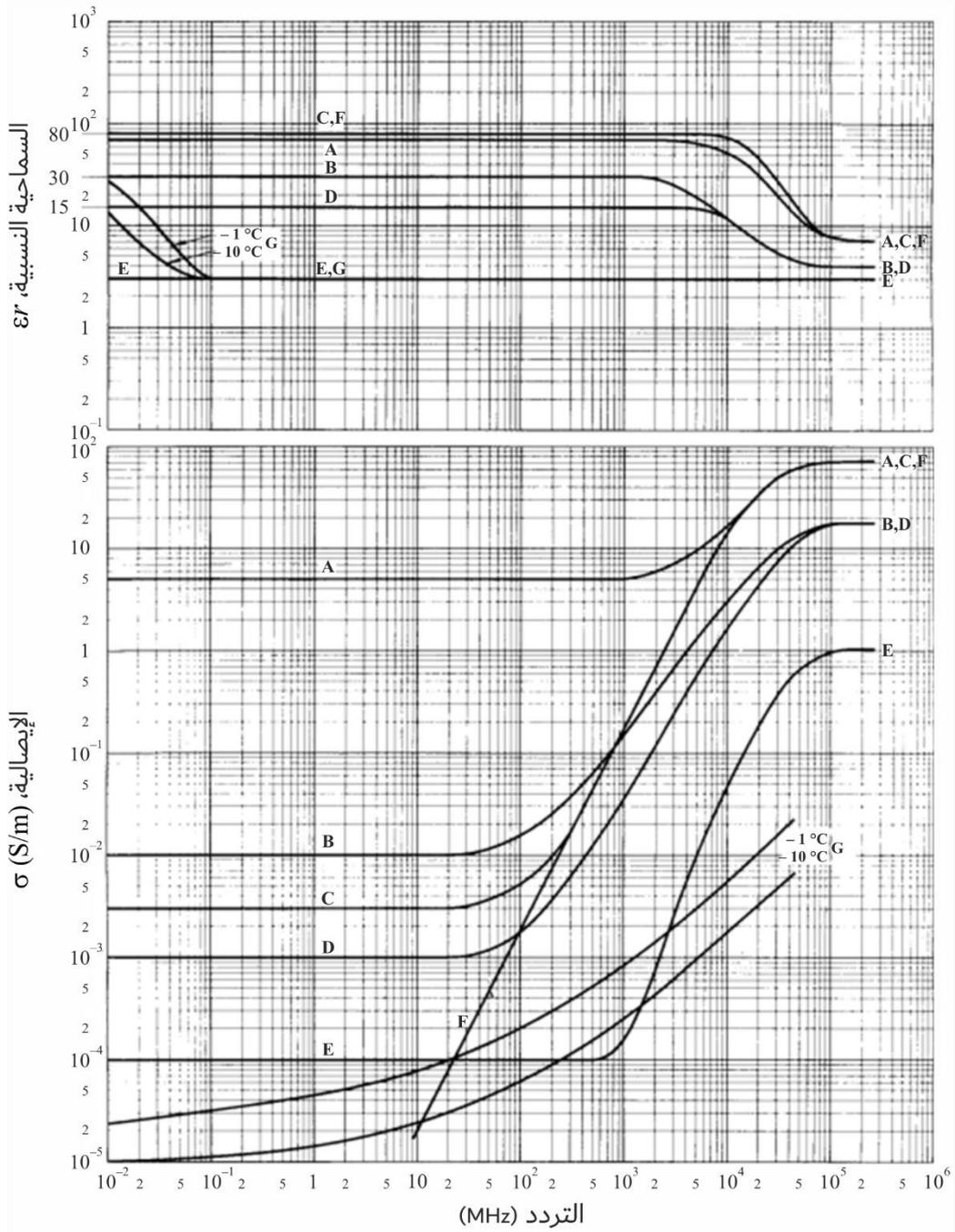
بالملاحق 1

الخصائص الكهربائية بدلالة السماحية والإيصالية على النحو المستخدم
في التوصيتين ITU-R P.368 و ITU-R P.832

1 مقدمة

استُنسخ الشكل 24 أدناه من الشكل 1 الوارد في التوصية ITU-R P.527-3 الذي يوضح القيم النمطية للإيصالية والسماحية لأنواع مختلفة من الأرض تبعاً للتردد. واستبقيت هذه الرسوم البيانية من المراجعات السابقة لهذه التوصية من باب التسهيل على مستخدمي التوصيتين ITU-R P.368 و ITU-R P.832.

الشكل 24

السماحية النسبية، ϵ_r ، والإيصالية، σ ، تبعاً للتردد

- A: مياه البحر (بملوحة متوسطة)، 20 درجة مئوية
 B: أرض رطبة
 C: مياه عذبة، 20 درجة مئوية
 D: أرض متوسطة الجفاف
 E: أرض جافة جداً
 F: مياه نقية، 20 درجة مئوية
 G: جليد (مياه عذبة)