

الاتحاد الدولي للاتصالات

# ITU-R

قطاع الاتصالات الراديوية في الاتحاد الدولي للاتصالات

التوصية ITU-R P.527-5  
(2019/08)

## الخصائص الكهربائية لسطح الأرض

السلسلة P  
انتشار الموجات الراديوية

## تمهيد

يضطلع قطاع الاتصالات الراديوية بدور 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 <http://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
<b>انتشار الموجات الراديوية</b>	<b>P</b>
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، 2020

© ITU 2020

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).

## التوصية ITU-R P.527-5

## الخصائص الكهربائية لسطح الأرض

(1978-1982-1992-2017-2019)

## 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،  $\epsilon$ ، والإيصالية الكهربائية،  $\sigma$ ؛

ب) أن نفاذية سطح الأرض،  $\mu$ ، 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،  $\mu$
- السماحية الكهربائية،  $\epsilon$
- الإيصالية الكهربائية<sup>1</sup>،  $\sigma$ .

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  $\omega$ ، ووقت  $t$ ، ونفاذية مغناطيسية  $\mu$ ، وسماحية كهربائية  $\epsilon$ ، وإيصالية كهربائية  $\sigma$ ، 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/A<sup>2</sup>)
- إيصالية الفراغ  $\sigma_0 = 0.0$  (S/m)

ومن المناسب تعريف السماحية النسبية،  $\epsilon_r$ ، والنفاذية النسبية،  $\mu_r$ ، 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  $\epsilon$  و  $\mu$  هما السماحية والنفاذية المصاحبتين للوسط. وتفترض هذه التوصية  $\mu = \mu_0$ ، وفي تلك الحالة  $\mu_r = 1$ .

<sup>1</sup> يطلق عليها الإيصالية الكهربائية لتمييزها 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  $\sigma$  و  $\epsilon$  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. ويُستخدم 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 وتُستخدم لوصف الخصائص الكهربائية للمواد.

وبينما تشير السماحية إلى  $\epsilon$ ، وتشير السماحية النسبية إلى  $\epsilon_r$ ، 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  $\epsilon$  أن تكون معقدة.

وفي المعادلة (1b)،  $\epsilon_r'$  هي الجزء الحقيقي من السماحية المعقدة، و  $\epsilon_r''$  هي الجزء التخيلي من السماحية المعقدة. ويرتبط الجزء الحقيقي من السماحية النسبية المعقدة،  $\epsilon_r'$ ، بالطاقة المخزنة عندما تتعرض المادة إلى مجال كهرومغناطيسي. ويؤثر الجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة،  $\epsilon_r''$ ، على امتصاص الطاقة ويعرف بعامل الخسارة. وترتبط علامة ناقص في المعادلة (1b) بمجال كهرومغناطيسي له اعتماد زمني هو  $e^{2j\pi f t}$  (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،  $\epsilon_r''$ ، إلى حدين:

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

حيث يمثل  $\epsilon_d''$  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،  $\epsilon_d''$ ، وبالتالي  $\epsilon_r''$  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،  $\sigma$ ، قيمةً متناهية غير الصفرة. ووفقاً لذلك، فيما يجنح التردد نحو الصفرة، يجنح الجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة لهذه المواد نحو  $\infty$  بشكل يمكن استنتاجه من المعادلة (3). وفي هذه الحالة، من الأسهل العمل مع الإيصالية  $\sigma$  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  $f_{\text{GHz}}$  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 بين الحد الآخر تبديد الطاقة المرتبط بتيار الإزاحة.

وتقدم هذه التوصية أساليب التنبؤ للأجزاء الحقيقية والتخيلية من السماحية النسبية المعقدة،  $\epsilon_r'$  و  $\epsilon_r''$ ، 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،  $\delta$ ، 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،  $\delta$ ، في وسط متجانس للسماحية النسبية المعقدة  $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$  بواسطة:

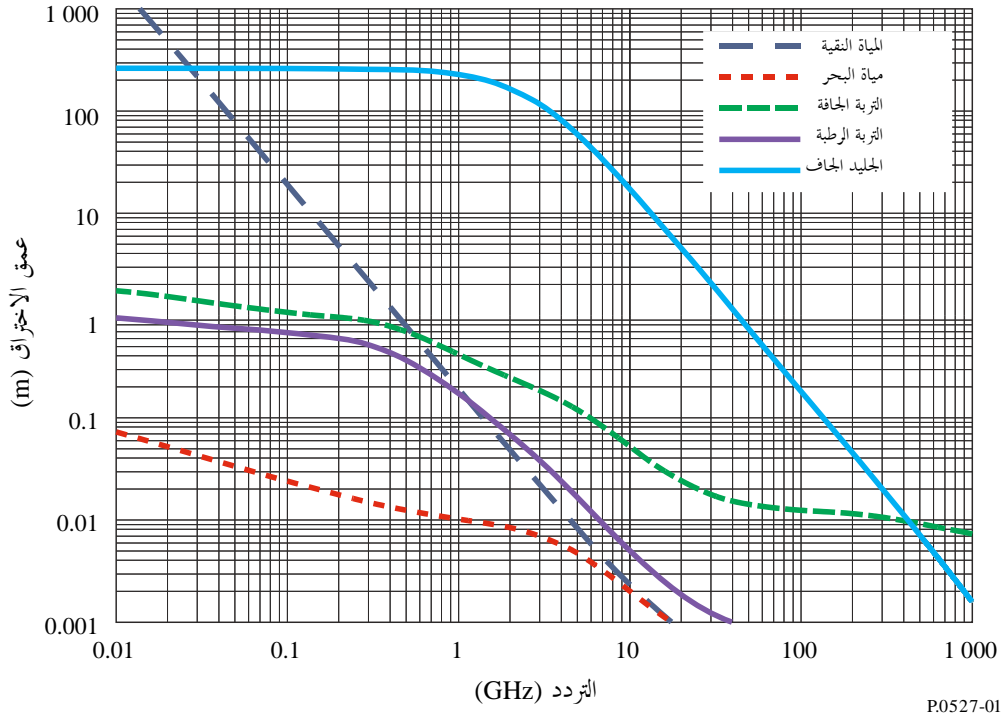
$$(4) \quad \delta = \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{\sqrt{(\epsilon_r')^2 + (\epsilon_r'')^2} - \epsilon_r'}} \quad (\text{m})$$

حيث  $\lambda$  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 والتربة الجافة والتربة 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 والتربة 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



P.0527-01

## 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 إيصاليتها 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 النماذج الموصوفة في الأقسام الفرعية التالية أساليب التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة لأسطح الأرض التالية:

- مياه نقية
- مياه البحر (أي المياه المالحة)
- جليد
- تربة جافة (مزيج من الرمل والطين والطيني)
- تربة رطبة (تربة جافة بالإضافة إلى الماء)
- غطاء نباتي (فوق وتحت نقطة التجمد)

وفي هذا القسم، تُختار لاحقات سفلية للسماحية النسبية المعقدة، وبالتالي تُختار لاحقات سفلية للأجزاء الحقيقية والتخيلية من أجل الدلالة على السماحية النسبية المتخصصة لحالات معينة؛ مثلاً اللاحقة السفلية "pw" للمياه النقية، و"sw" لمياه البحر، وما إلى ذلك.

### 1.5 المياه

يقدم هذا القسم الفرعي أساليب التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة للمياه النقية ومياه البحر والجليد.

#### 1.1.5 المياه النقية

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

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

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

$$(7) \quad \epsilon''_{pw} = \frac{(f_{\text{GHz}}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2}$$

حيث:

$$(8) \quad \epsilon_s = 77.66 + 103.3\Theta$$

$$(9) \quad \epsilon_1 = 0.0671\epsilon_s$$

$$(10) \quad \epsilon_\infty = 3.52 - 7.52\Theta$$

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



و  $f_1$  و  $f_2$  هما ترددات 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)،  $\epsilon_{sw}$ ، هي دالة للتردد،  $f_{\text{GHz}}$  (GHz) ودرجة الحرارة،  $T$  (°C) والملوحة  $S$  (g/kg) أو ppt<sup>2</sup>.

$$(14) \quad \epsilon_{sw} = \epsilon'_{sw} - j \epsilon''_{sw}$$

$$(15) \quad \epsilon'_{sw} = \frac{\epsilon_{ss} - \epsilon_{1s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{\epsilon_{1s} - \epsilon_{\infty s}}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \epsilon_{\infty s}$$

$$(16) \quad \epsilon''_{sw} = \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{1s})(\epsilon_{ss} - \epsilon_{1s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{1s})^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_{2s})(\epsilon_{1s} - \epsilon_{\infty s})}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_{2s})^2} + \frac{18\sigma_{sw}}{f_{\text{GHz}}}$$

حيث:

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

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

$$(19) \quad \epsilon_{1s} = \epsilon_1 \exp(-6.28908 \times 10^{-3} S + 1.76032 \times 10^{-4} S^2 - 9.22144 \times 10^{-5} T S)$$

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

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

وتحصل قيم  $\epsilon_s$  و  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_{\infty}$  و  $f_1$  و  $f_2$  من المعادلات (8) و (9) و (10) و (12) و (13). علاوةً على ذلك، تعطى  $\sigma_{sw}$  بواسطة:

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

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

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

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

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

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

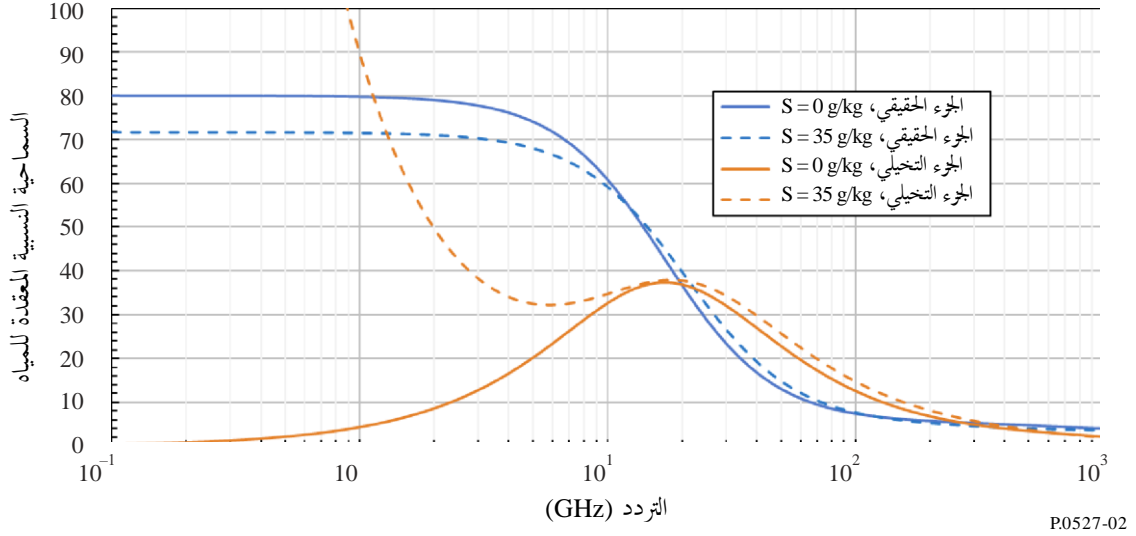
$$(27) \quad \alpha_1 = 49.843 - 0.2276 S + 0.198 \times 10^{-2} S^2$$

والسماحية النسبية المعقدة للمياه النقية المعطاة في المعادلات (5) - (7) هي حالة خاصة من المعادلات (14) - (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.

<sup>2</sup> يشير مصطلح "ppt" إلى "أجزاء في كل ألف جزء".

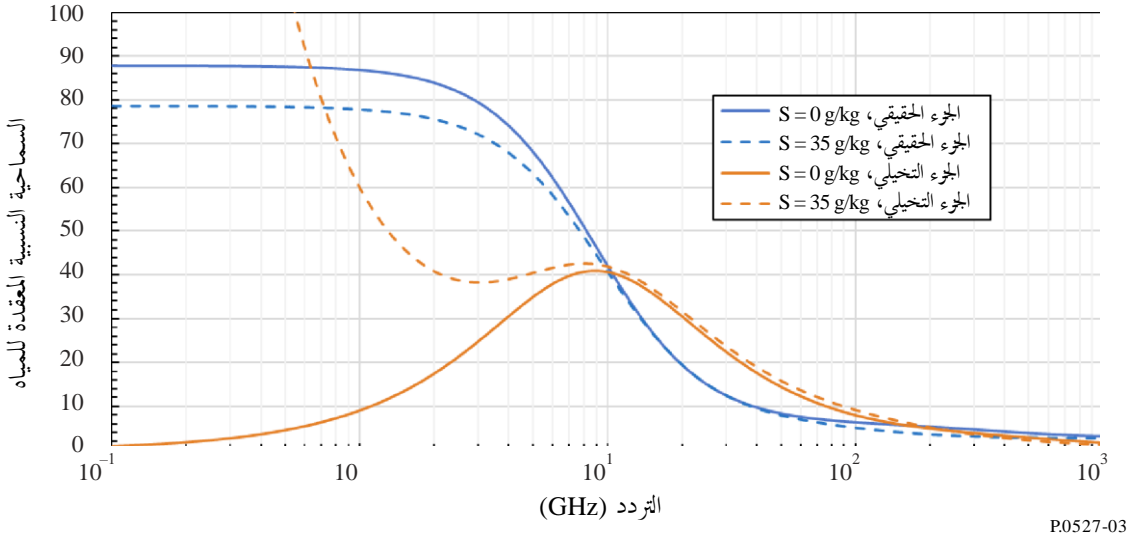
الشكل 2

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



الشكل 3

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



### 3.1.5 الجليد

يقدم هذا القسم الفرعي أساليب التنبؤ بالسماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف والجليد الرطب.

#### 1.3.1.5 الجليد الجاف

يتكون الجليد الجاف من مياه نقية مجمدة ( $T \leq 0\text{ °C}$ ). والسماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف،  $\epsilon_{ice}$ ، هي

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

والجزء الحقيقي من السماحية النسبية المعقدة،  $\epsilon_{ice}$ ، هو دالة لدرجة الحرارة،  $T$  (°C)، وهو مستقل عن التردد:

$$(29) \quad \epsilon'_{ice} = 3.1884 + 0.00091 T$$

والجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة،  $\epsilon''_{ice}$ ، هو دالة لدرجة الحرارة،  $T$  (°C) والتردد،  $f_{GHz}$  (GHz):

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

حيث:

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

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

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

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

ويظهر في الشكل 4 الجزآن الحقيقي والتخيلي من السماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف في درجة الحرارة  $T = -10$  °C.

### 2.3.1.5 الجليد الرطب

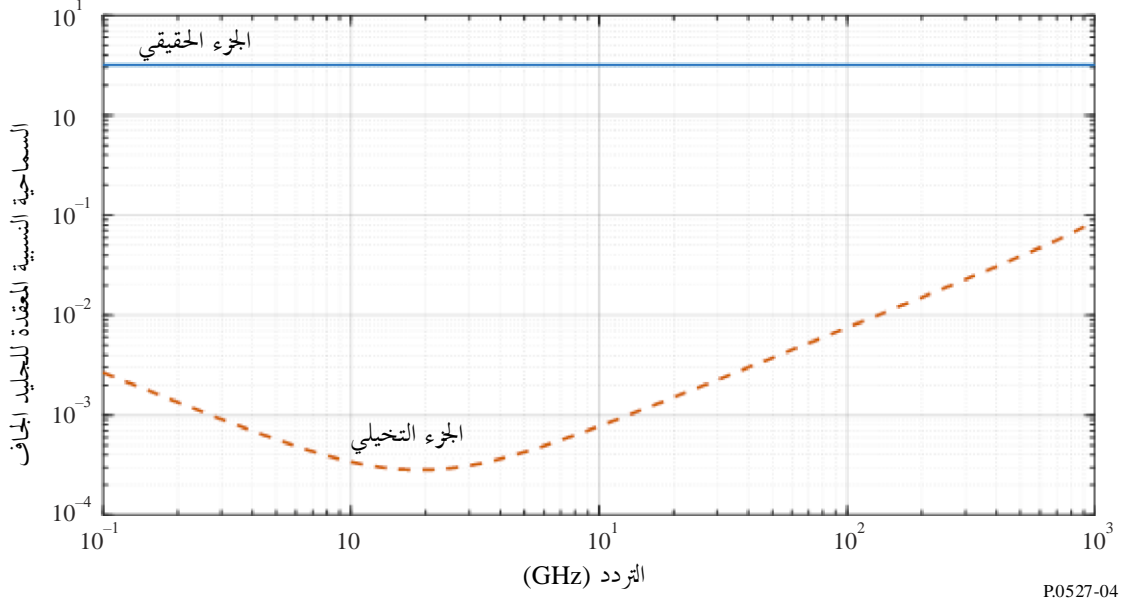
عندما يتبلل الجليد (عند 0 درجة مئوية)، تحاط حبيباته بالمياه السائلة. وباعتبار حبيبات الجليد كحاويات كروية داخل خلفية مائية سائلة، تطبق صيغة خلط عازل ماكسويل غارنيت (Maxwell Garnett) للتعبير عن السماحية النسبية المعقدة للجليد الرطب،  $\epsilon_{wet ice}$ ، كمزيج من السماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف،  $\epsilon_{ice}$ ، والسماحية النسبية المعقدة للمياه النقية،  $\epsilon_{pw}$ .

$$(35) \quad \epsilon_{wet ice} = \left( \frac{(\epsilon_{ice} + 2\epsilon_{pw}) + 2(\epsilon_{ice} - \epsilon_{pw})(1 - F_{wc})}{(\epsilon_{ice} + 2\epsilon_{pw}) - (\epsilon_{ice} - \epsilon_{pw})(1 - F_{wc})} \right) \epsilon_{pw}$$

و  $F_{wc}$  هو كسر حجم الماء السائل ( $m^3/m^3$ ). والمعادلة (35) معادلة معقدة، ويمكن تقسيمها إلى جزء حقيقي وجزء تخيلي. وكل جزء هو دالة مؤلفة من أجزاء حقيقية وتخييلية من السماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف والأجزاء المقابلة من الماء. وتصور في الشكل 5 الأجزاء الحقيقية والتخييلية من الجليد الرطب عند التردد  $f_{GHz} = 60$  GHz ودرجة الحرارة  $T = 0$  °C كدالة للمحتوى من الماء السائل.

الشكل 4

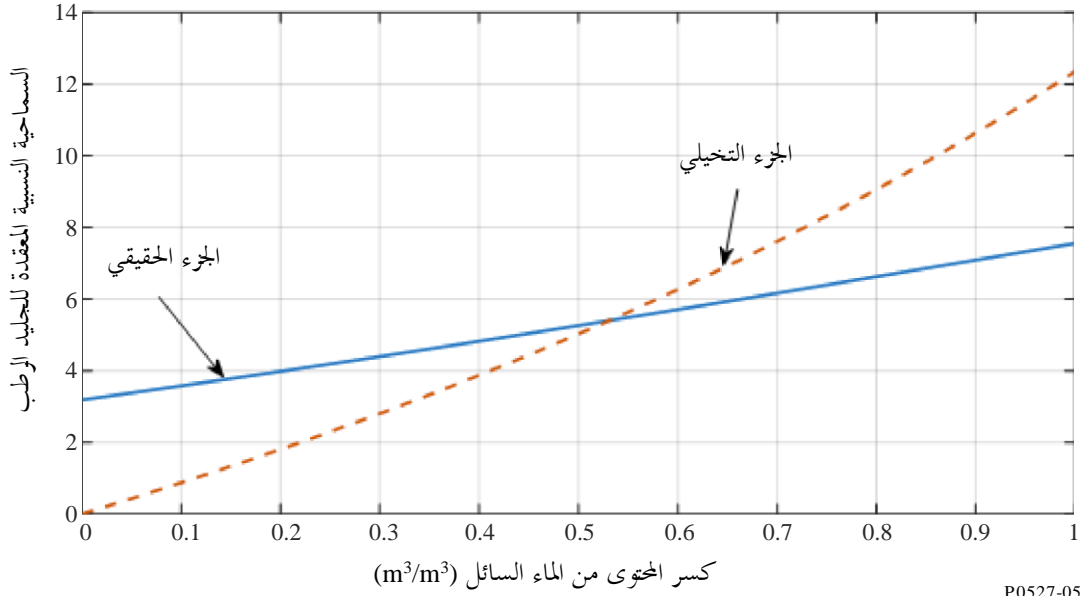
السماحية النسبية المعقدة للجليد الجاف تبعاً للتردد  
( $T = -10\text{ °C}$ )



P0527-04

الشكل 5

السماحية النسبية المعقدة للجليد الرطب كدالة للمحتوى من الماء السائل  
(عند التردد  $f=60\text{GHz}$  ودرجة الحرارة  $T = 0\text{ °C}$ )



P0527-05

## 2.5 التربة

إن السماحية النسبية المعقدة للتربة،  $\epsilon_{soil}$ ، هي دالة للتردد،  $f_{\text{GHz}}$ ، 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، وكذلك د) الجاذبية النوعية (أي كثافة كتلة التربة مقسومة على كثافة الكتلة المائية) للخليط الجاف لمكونات التربة،  $\rho_s$ ، هـ) محتوى الماء الحجمي،  $m_v$ ، المساوي لحجم الماء مقسوماً على إجمالي حجم التربة في عينة تربة معينة.

وتلزم كذلك كمدخل الكثافة الإجمالية (أي كتلة التربة في حجم معين  $(g\ cm^{-3})$  من التربة،  $\rho_b$ . وإذ يتعذر قياسها المباشر بسهولة، يمكن اشتقاقها من النسب المئوية للمكونات الجافة. وفي حال عدم تيسر دالة شبه النقل المحلية، يمكن استخدام دالة شبه النقل التجريبية التالية

$$(36) \quad \rho_b = 1.07256 + 0.078886 \ln(P_{sand}) + 0.038753 \ln(P_{clay}) + 0.032732 \ln(P_{silt})$$

والمعادلة (36) غير موثوقة بأقل من 1% من أي مكون. فإذا قلَّت النسب المئوية لمكون عن 1%، ينبغي حذف الحد المقابل في المعادلة (36). وينبغي أن يبلغ مجموع النسب المئوية المكونة للحدود المضمنة 100%

ويبين الجدول 1 النسب المئوية المكونة النمطية، والجاذبية النوعية، والكثافات الإجمالية لأربعة أنواع من التربة ذات الصفة التمثيلية.

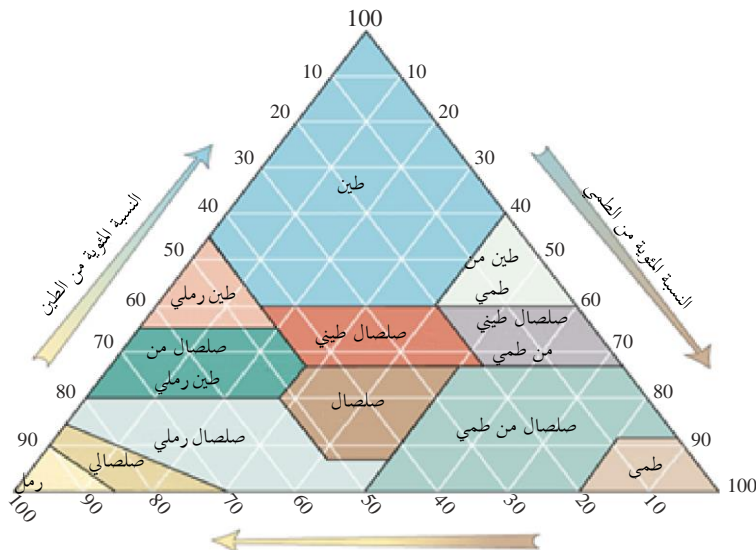
الجدول 1

## المعلومات الفيزيائية لمختلف أنواع التربة

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

الشكل 6

## مثلث قوام التربة



يستند صنف قوام تسمية التربة الوارد في الصف الأول من الجدول 1 إلى مثلث قوام التربة المبين في الشكل 6.

ويعتبر أسلوب التنبؤ هذا التربة أنها خليط من أربعة مكونات: أ) جزئيات التربة المكونة من مزيج من الطين والرمل والطيني، ب) الهواء، ج) الماء المقيد (الماء المرتبط بجزئيات 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،  $\epsilon_{soil}$ ، قوامها هذا الخليط ذو المكونات الأربعة، هي

$$(37) \quad \epsilon_{soil} = \epsilon'_{soil} - j\epsilon''_{soil}$$

حيث:

$$(38) \quad \epsilon'_{soil} = \left[ 1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\{\epsilon'_{sm}\}^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} (\epsilon'_{fw})^\alpha - m_v \right]^{1/\alpha}$$

$$(39) \quad \epsilon''_{soil} = \left[ m_v^{\beta''} (\epsilon''_{fw})^\alpha \right]^{1/\alpha}$$

$$(40) \quad \epsilon'_{sm} = (1.01 + 0.44 \rho_s)^2 - 0.062$$

$$(41) \quad \beta' = 1.2748 - 0.00519 P_{sand} - 0.00152 P_{clay}$$

$$(42) \quad \beta'' = 1.33797 - 0.00603 P_{sand} - 0.00166 P_{clay}$$

و

$$(43) \quad \alpha = 0.65$$

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

$$(44) \quad \epsilon'_{fw} = \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \epsilon_\infty + \frac{18 \sigma'_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v}$$

$$(45) \quad \epsilon''_{fw} = \frac{(f_{GHz}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{GHz}/f_1)^2} + \frac{(f_{GHz}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{GHz}/f_2)^2} + \frac{18 \sigma''_{eff} (\rho_s - \rho_b)}{f_{GHz} \rho_s m_v}$$

وحيث تحسّل قيم  $\epsilon_s$  و  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_\infty$  و  $f_1$  و  $f_2$  من المعادلات (8) و (9) و (10) و (12) و (13). وتعطى  $\sigma'_{eff}$  و  $\sigma''_{eff}$  بواسطة:

$$(46) \quad \sigma'_{eff} = (f_{GHz}/1.35) \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1.35)^2} \right)$$

$$(47) \quad \sigma''_{eff} = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + (f_{GHz}/1.35)^2}$$

و

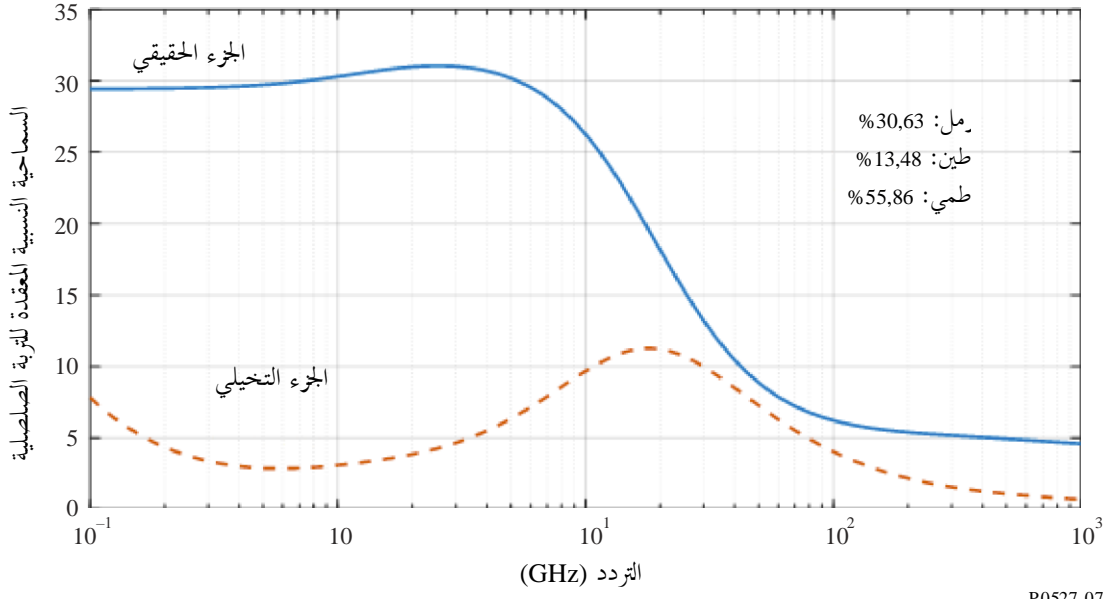
$$(48) \quad \sigma_1 = 0.0467 + 0.2204 \rho_b - 0.004111 P_{sand} - 0.006614 P_{clay}$$

$$(49) \quad \sigma_2 = -1.645 + 1.939 \rho_b - 0.0225622 P_{sand} + 0.01594 P_{clay}$$

وتظهر السماحية النسبية المعقدة لمنمطين من أنواع التربة في الأشكال 7 و 8 و 9. وتتشابه تركيبة التربة في الشكلين 7 و 9 فيما عدا محتوى الماء الحجمي، مما يشير إلى أن الجزء الحقيقي والجزء التخيلي من السماحية النسبية المعقدة يرتبطان مباشرة بالمحتوى المائي الحجمي.

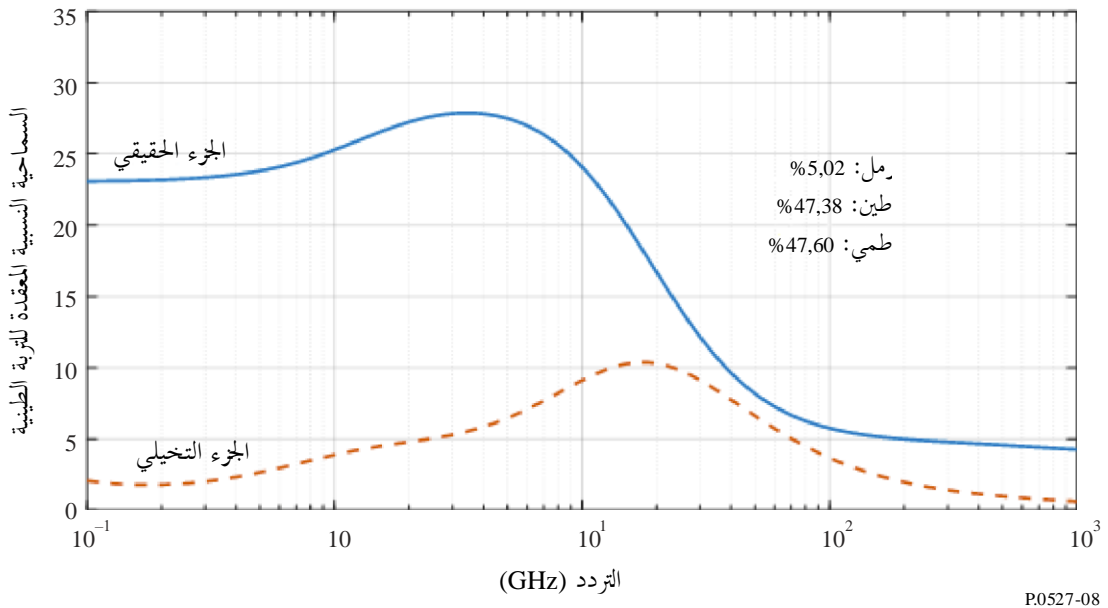
الشكل 7

السماحية النسبية المعقدة لتربة صلبة من الطمي تبعاً للتردد  
 $(m_v = 0.5, T = 23 \text{ }^\circ\text{C}, \rho_s = 2.59, \rho_b = 1.5750 \text{ g cm}^{-3})$



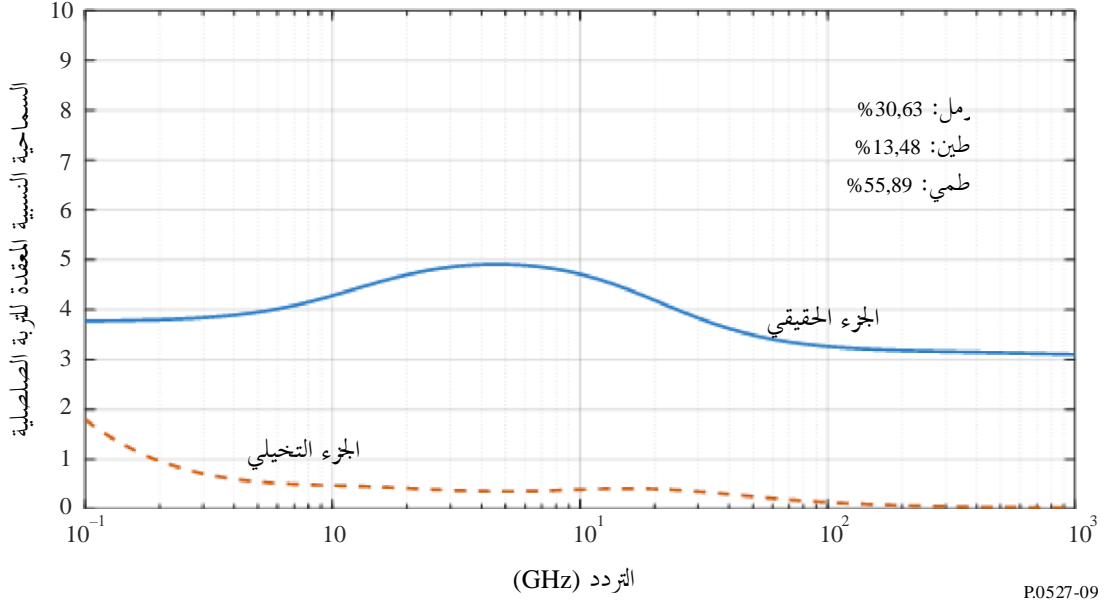
الشكل 8

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 9

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

$$(50) \quad M_g = \frac{M_{mv} - M_{dv}}{M_{mv}}$$

هو  $M_{mv}$  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

$$(51) \quad \epsilon_v = \epsilon'_v - j \epsilon''_v$$

ويرد في الفقرة 1.3.5 الجزء الحقيقي،  $\epsilon'_v$ ، والجزء التخيلي،  $\epsilon''_v$ ، 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:

$$(52) \quad \epsilon'_v = \epsilon_{dv} + v_{fw} \left[ \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} \right] + v_{bw} \left[ 2.9 + \frac{55[1 + \sqrt{(f_{\text{GHz}}/0.02f_1)}]}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0.02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0.01f_1)} \right]$$

$$(53) \quad \epsilon''_v = v_{fw} \left[ \frac{(f_{\text{GHz}}/f_1)(\epsilon_s - \epsilon_1)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_1)^2} + \frac{(f_{\text{GHz}}/f_2)(\epsilon_1 - \epsilon_\infty)}{1 + (f_{\text{GHz}}/f_2)^2} + \frac{22.86}{f_{\text{GHz}}} \right] + v_{bw} \left[ \frac{55\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0.02f_1)}}{1 + 2\sqrt{(f_{\text{GHz}}/0.02f_1)} + (f_{\text{GHz}}/0.01f_1)} \right]$$

حيث  $\epsilon_{dv}$  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:

$$(54) \quad \epsilon_{dv} = 1.7 - 0.74 M_g + 6.16 M_g^2$$



$$(55) \quad v_{fw} = M_g(0.55 M_g - 0.076)$$

$$(56) \quad v_{bw} = 4.64M_g^2/(1 + 7.36M_g^2)$$

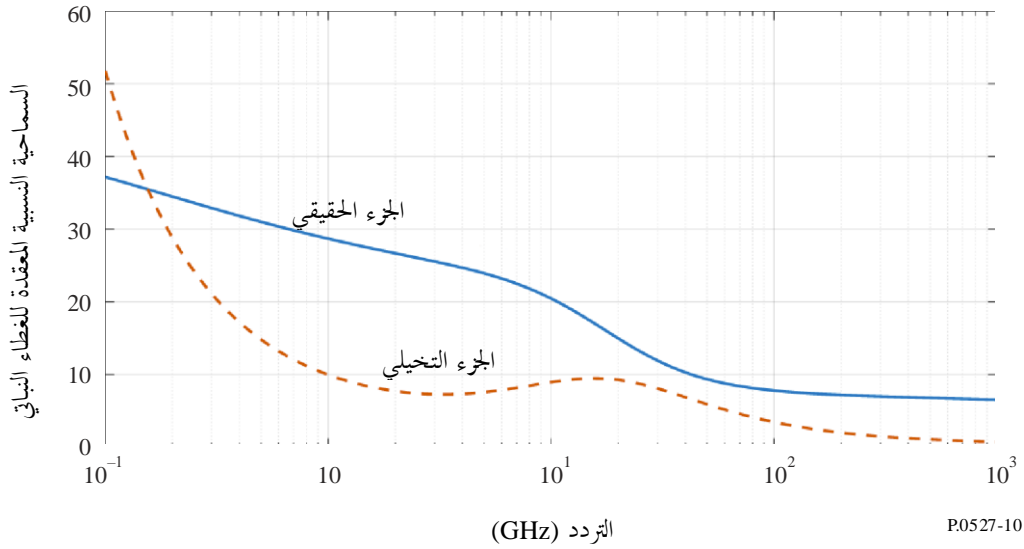
وتحصّل قيم  $\epsilon_s$  و  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_\infty$  و  $f_1$  و  $f_2$  من المعادلات (8) و (9) و (10) و (12) و (13) على التوالي.

والمعادلتان (52) و (53) 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.

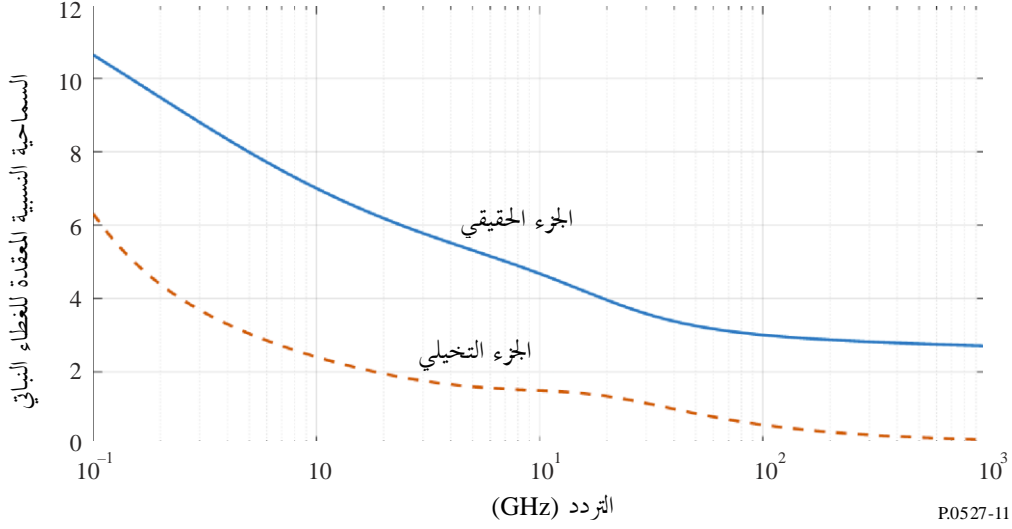
### الشكل 10

السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي تبعاً للتردد  
( $M_g = 0.68, T = 22 \text{ °C}$ )



الشكل 11

السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي تبعاً للتردد  
( $M_g = 0.26, T = 22\text{ °C}$ )



### 2.3.5 درجات حرارة أقل من درجة التجمد

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

$$(57) \quad \epsilon'_V = \epsilon_{dv} + v_{fw} \left[ 4.9 + \frac{82.2}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} \right] + v_{bw} [8.092 + 14.2067 X1] + 3.15 v_{ice}$$

$$(58) \quad \epsilon''_V = v_{fw} \left[ \frac{82.2(f_{\text{GHz}}/9)}{1 + (f_{\text{GHz}}/9)^2} + \frac{11.394}{f_{\text{GHz}}} \right] + 14.2067 v_{bw} Y1$$

حيث:

$$(59) \quad \epsilon_{dv} = 6.76 - 10.24 M_g + 6.19 M_g^2$$

$$(60) \quad v_{fw} = (-0.106 + 0.6591 M_g - 0.610 M_g^2) \exp \left( (0.06 + 0.6883 M_g + 0.0001 M_g^2) \Delta \right)$$

$$(61) \quad v_{bw} = (-0.16 + 1.1876 M_g - 0.387 M_g^2) \exp \left( (0.721 - 1.2733 M_g + 0.8139 M_g^2) \Delta \right)$$

$$(62) \quad v_{ice} = A_{ice} \Delta^2 + B_{ice} \Delta + C_{ice}$$

$$(63) \quad A_{ice} = 0.001 - 0.012 M_g + 0.0082 M_g^2$$

$$(64) \quad B_{ice} = 0.036 - 0.2389 M_g + 0.1435 M_g^2$$

$$(65) \quad C_{ice} = -0.0538 + 0.4616 M_g - 0.3398 M_g^2$$

$$(66) \quad X1 = \frac{1 + (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.2054} \cos(0.2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.2054} \cos(0.2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.4108}}$$

$$(67) \quad Y1 = \frac{(f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.2054} \sin(0.2054\pi/2)}{1 + 2 (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.2054} \cos(0.2054\pi/2) + (f_{\text{GHz}}/1.2582)^{0.4108}}$$

$$(68) \quad \Delta = T - T_f$$

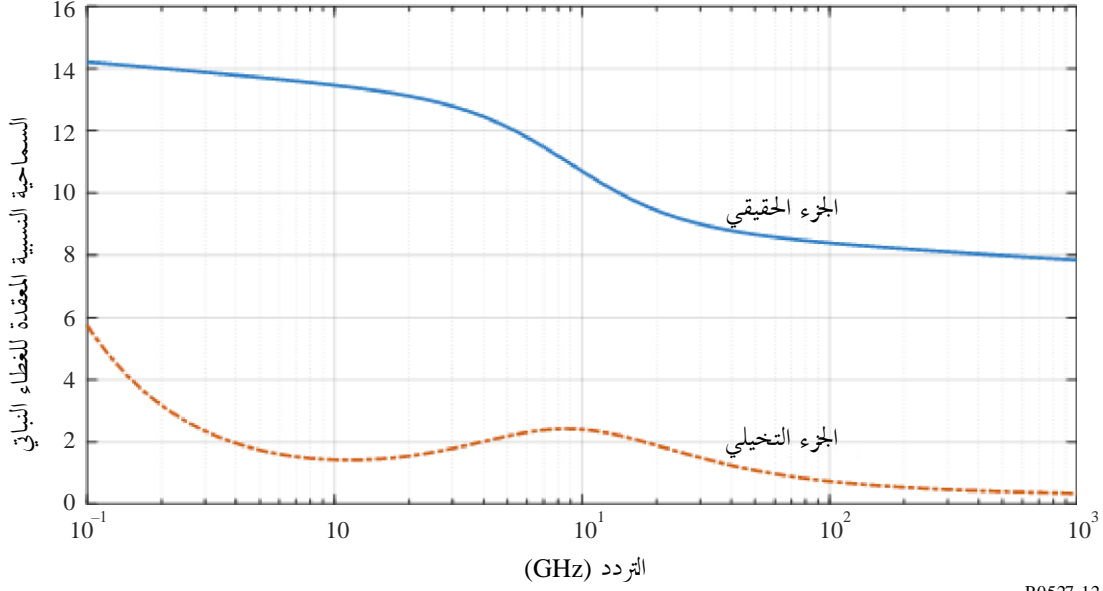
ودرجة حرارة التجمد للغطاء النباتي،  $T_f$ ، هي -6,5 درجة مئوية.

ويبين الشكلان 12 و13 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 12

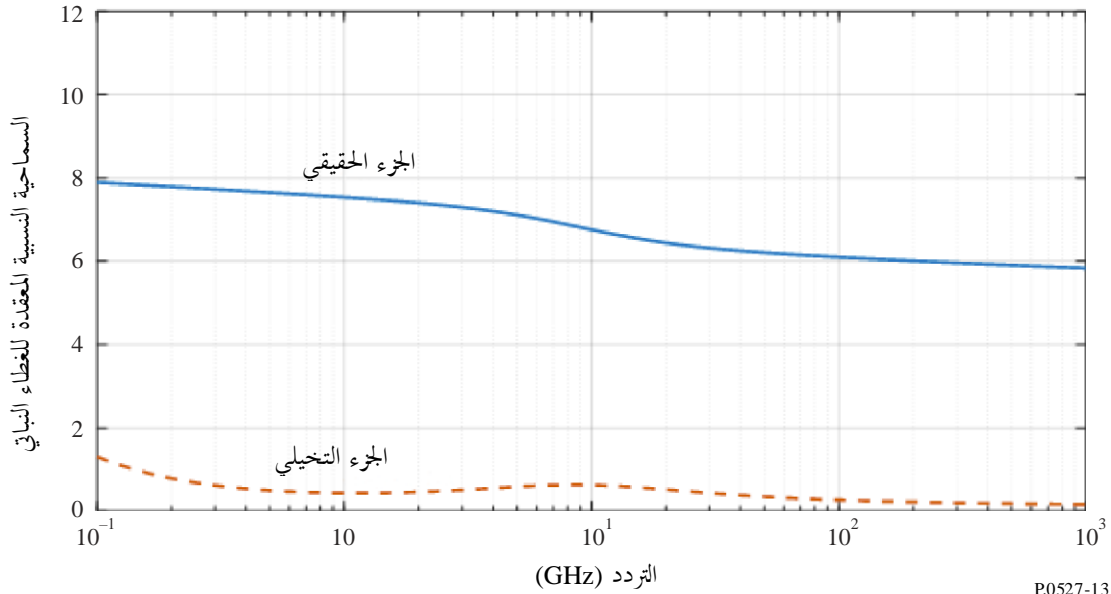
السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي تبعاً للتردد  
( $M_g = 0.68, T = -7^\circ\text{C}$ )



P.0527-12

الشكل 13

السماحية النسبية المعقدة للغطاء النباتي تبعاً للتردد  
( $M_g = 0.68, T = -10^\circ\text{C}$ )



P.0527-13

## 6 الانعائية

تعرف الانعائية،  $\epsilon$ ، 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 الانعائية والانعكاسية،  $\rho$ ، في نفس التردد بالحفاظ على الطاقة؛ أي  $\epsilon + \rho = 1$ . وترتبط انعائية سطح معين بسماحيته النسبية المعقدة،  $\epsilon$ ، من خلال معادلات فرينيل:

$$(69) \quad \epsilon = 1 - |r_p|^2, \quad p = v, h, c$$

حيث:

$$(70) \quad r_v = \frac{\epsilon \cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\epsilon \cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}$$

$$(71) \quad r_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta}}$$

$$(72) \quad r_c = \frac{r_v + r_h}{2}$$

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

$$(73) \quad r_v = \frac{\epsilon - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \sqrt{\epsilon}}$$

$$(74) \quad r_h = \frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}}$$

حيث:

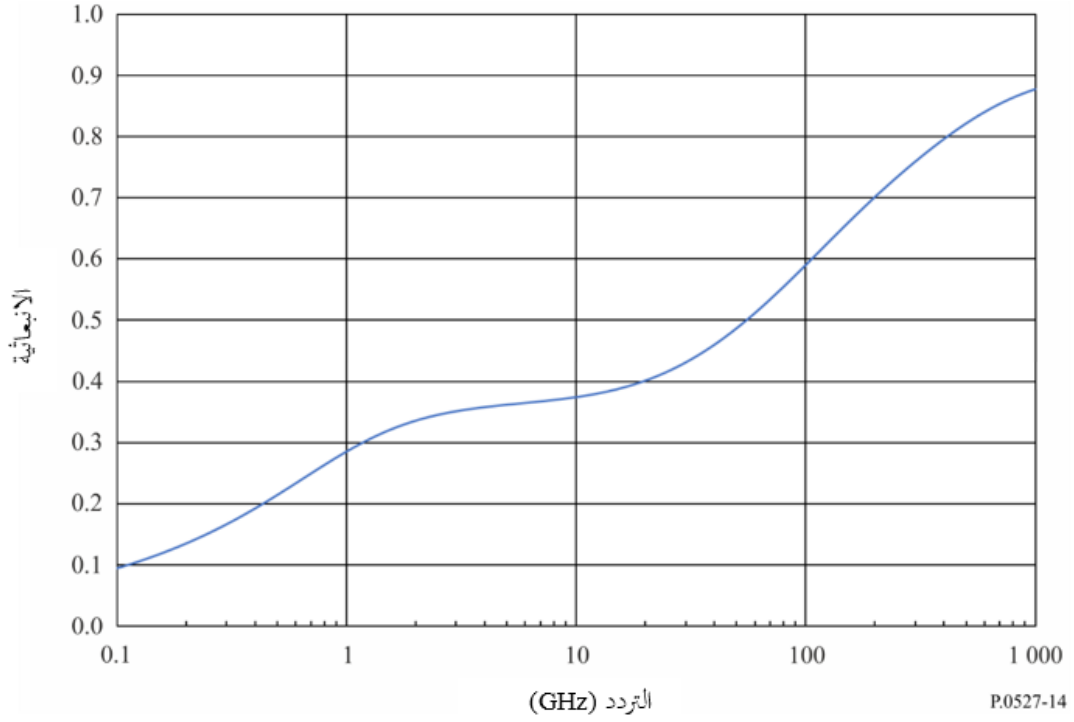
$$(75) \quad r_v = \frac{\epsilon - \sqrt{\epsilon}}{\epsilon + \sqrt{\epsilon}} = -\frac{\sqrt{\epsilon} (1 - \sqrt{\epsilon})}{\sqrt{\epsilon} (1 + \sqrt{\epsilon})} = -\frac{1 - \sqrt{\epsilon}}{1 + \sqrt{\epsilon}} = -r_h$$

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

وبالنسبة للعمودي على السطح والمكونين المستقطبين رأسياً وأفقياً، يبين الشكل 14 انعائية 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 15 انعائية تربة طينية من الطمي وفقاً للظروف المبينة في الشكل 8 (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 16 انعائية الغطاء النباتي المقابلة للظروف المبينة في الشكل 11 (أي  $M_g = 0,26$  و  $T = 22^\circ \text{C}$ ).

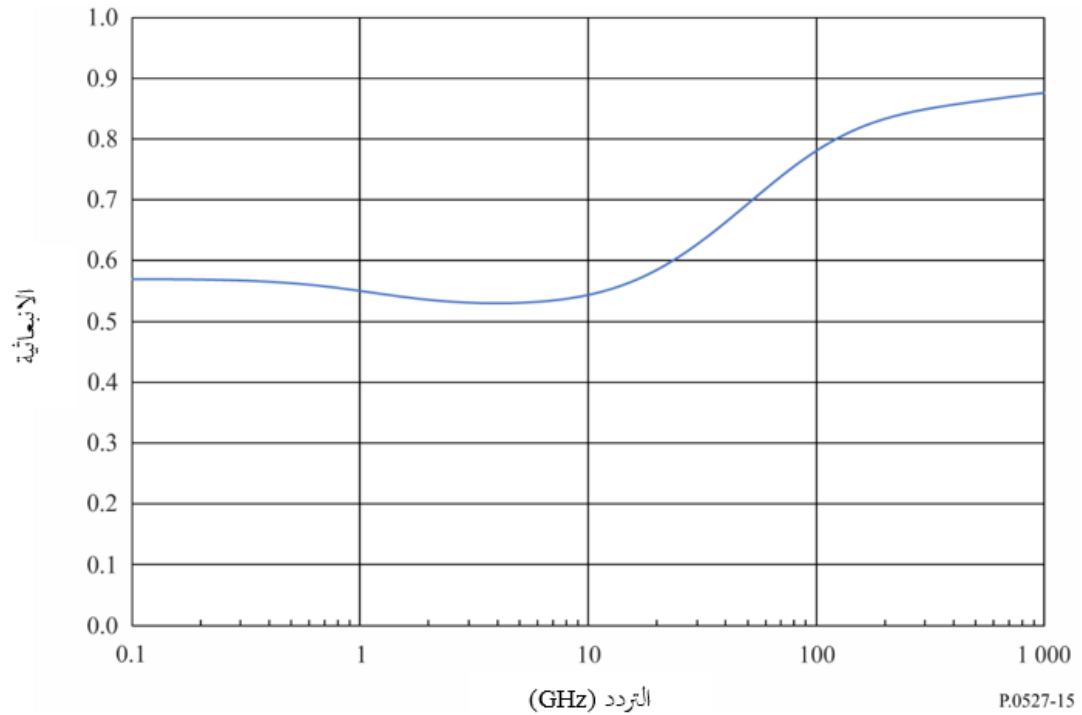
الشكل 14

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



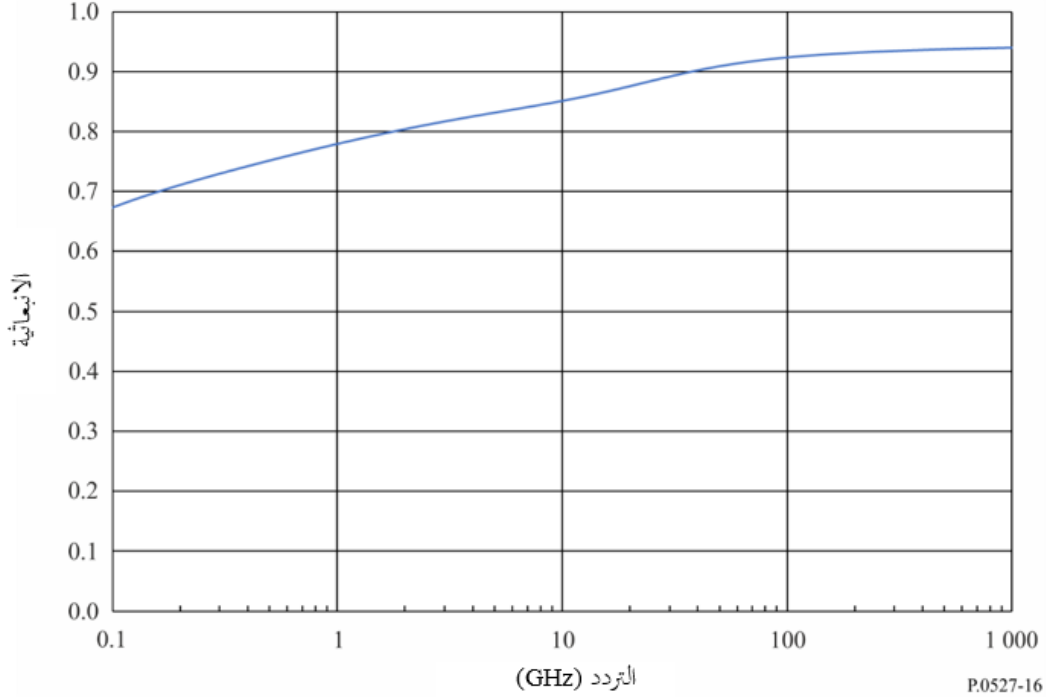
الشكل 15

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 16

انبعاثية الغطاء النباتي ( $M_g = 0.26, T = 22\text{ °C}$ )



## 7 الانبعاثية المتاحة للمحيط

الانبعاثية المتاحة للمحيط،  $\epsilon_{ocean}$ ، هي دالة للاستقطاب والتردد وزاوية الورد 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،  $\epsilon$ ، المذكورة في القسم 6 باستخدام السماحية المعقدة لمياه البحر،  $\epsilon_{sw}$ ، المذكورة في الفقرة 2.1.5؛ و  $\Delta \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S)$  هي الانبعاثية المتاحة المتزايدة كدالة لسرعة الرياح. والمعلمات هي:

$p$ : الاستقطاب ( $v =$  رأسي؛  $h =$  أفقي)

$f_{GHz}$ : التردد (GHz)

$\theta$ : زاوية الورد

$W$ : سرعة الرياح (m/s)

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

$S$ : الملوحة (ppt)

$$(76) \quad \Delta \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta, W, T, S) = \widehat{\Delta} \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) \left( \frac{\theta}{\theta_{ref}} \right)^{x_p} + \frac{1}{2} \left[ \widehat{\Delta} \epsilon_{ocean}(v, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) + \widehat{\Delta} \epsilon_{ocean}(h, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) \right] \times \left[ 1 - \left( \frac{\theta}{\theta_{ref}} \right)^{x_p} \right]$$

حيث  $1,5 = x_h, 4,0 = x_v$

$$(77) \quad \widehat{\Delta} \epsilon_{ocean}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, W, T, S) = \delta_{ref}(p, f_{GHz}, W) \frac{\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, T, S)}{\epsilon_{ocean,0}(p, f_{GHz}, \theta_{ref}, T_{ref}, S)}$$

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

$$(78) \quad \delta_{ref}(p, f_{GHz}, W) = \sum_{k=1}^5 \delta_k(p, f_{GHz}) W^k$$

وترد المعاملات  $\delta_k(p, f_{GHz})$  في الجدول 2.

هذا النموذج صالح في الترددات من 6,8 إلى 85,5 GHz ولزوايا ورود على سطح الأرض بين  $0^\circ$  و  $65^\circ$  (أي لزوايا ارتفاع بين  $25^\circ$  و  $90^\circ$ ). 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 2 من خلال استكمال داخلي خطي للانبعائية بين الترددات الواردة في الجدول 2.

### الجدول 2

#### المعاملات $\delta_k(p, f_{GHz})$

$\delta_5$	$\delta_4$	$\delta_3$	$\delta_2$	$\delta_1$	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

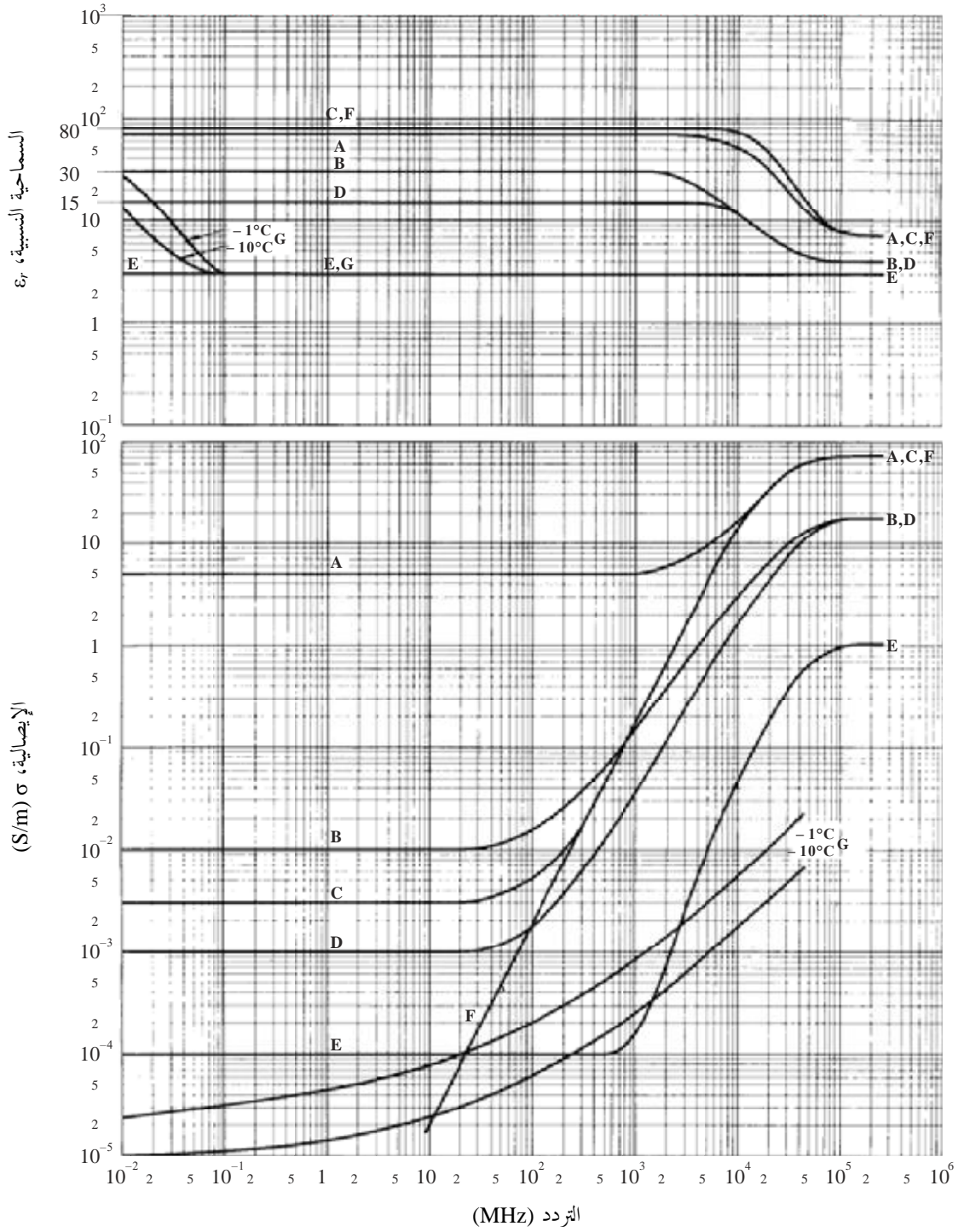
#### في التوصيتين ITU-R P.368 و ITU-R P.832

#### 1 مقدمة

استُنسخ الشكل 17 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 17

السماحية النسبية،  $\epsilon_r$ ، والإيصالية،  $\sigma$ ، تبعاً للتردد



- A: مياه البحر (مملوحة 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)