عبدالله ميرغني الطيب وكلاوس فون قادو
Abdallah Mirghani El Tayeb / Klaus von Gadow

نمو الغابات
Forest Growth

Universitätsdrucke Göttingen

Abdallah Mirghani El Tayeb, Klaus von Gadow

Forest Growth

This work is licensed under the
Creative Commons License 2.0 “by-nd”,
allowing you to download, distribute and print the
document in a few copies for private or educational
use, given that the document stays unchanged
and the creator is mentioned.
You are not allowed to sell copies of the free version.

erschienen in der Reihe der Universitätsdrucke
im Universitätsverlag Göttingen 2006

Abdallah Mirghani El Tayeb,
Klaus von Gadow

Forest Growth

Universitätsverlag Göttingen
2006

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Contact to the authors
Klaus v. Gadow
Institut für Waldinventur und Waldwachstum
Georg-August-Universität Göttingen
Büsgenweg 5
D-37077 Göttingen
URL http://www.uni-forst.gwdg.de/forst/iww/iww.htm

This work is protected by German Intellectual Property Right Law.
It is also available as an Open Access version through the publisher's homepage and the Online Catalogue of the State and University Library of Goettingen (http://www.sub.uni-goettingen.de). Users of the free online version are invited to read, download and distribute it. Users may also print a small number for educational or private use. However they may not sell print versions of the online book.

Typesetting and Layout: Osman Elsaid Adlan Abdelkareem
Cover Drawing: W. Tambour
Cover Design: Kilian Klapp

© Universitätsverlag Göttingen 2006
http://univerlag.uni-goettingen.de
ISBN-10: 3-938616-58-X
ISBN-13: 978-3-938616-58-1

نمو الغابات

عبدالله ميرغني الطيب وكلاوس فون قادو

شكر وتقدير

بسم الله الرحمن الرحيم والحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على اشرف المرسلين سيدنا محمد وعلى آله وصحبه اجمعين، وبعد.

أتقدم نيابة عن مؤلفي هذا الكتاب بالشكر والتقدير للمنظمة الألمانية للتبادل الأكاديمي التي جعلت من الممكن التقاء المؤلفين بجمهورية ألمانيا الإتحادية لفترة تقارب الثلاثة أشهر، وهي الفترة التي تم خلالها تأليف هذا الكتاب، والذي نأمل أن يكون إضافة للأدبيات المتعلقة بمجال الإدارة الفنية للغابات بشكل خاص ولعلوم الغابات بشكل عام.

الشكر كذلك لجامعة الخرطوم التي منحتني إذنا بالتغيب عن الجامعة لفترة ثلاثة أشهر وهي الفترة التي تطلبها تنفيذ الخطوات المتقدمة المتعلقة بتأليف هذا الكتاب .

أتقدم بجزيل الشكر للأستاذ سيف مضوي قاسم مبعوث جامعة الخرطوم لنيل درجة الدكتوراه بجامعة قوتنجن على حسن الضيافة عند القدوم وخلال فترة الإقامة وعلى وضع جهاز الحاسوب الخاص به لمدة تزيد عن الشهر تحت تصرفي لإنجاز هذا العمل، فالشكر له بلا حدود.

الشكر موصول كذلك للدكتورة هنادى إبراهيم الدسوقي على كل ما قدمت من مساعدات وفي شتى النواحي.

شكر خاص ،ممتد عبر العقود، للدكتور الإنسان عثمان حمدان وأسرته الكريمة، فرغم حداثة عهد هذه الأسرة بهذه المدينة الجميلة، الا أنها لم تكف عن تكرار الدعوات وتقديم المساعدات، في شتى المجالات، الأمر الذي جعلنا نحس بحلاوة الإنتماء، التي يتوق إليها من تذوق طعم الغربة عن الأهل والديار.

الشكر أخيرا وليس آخر لاسرتي: سمية، سلمى،سهيلة، إسلام ومحمد على الصبر الجميل إبان فترة غيابى.

د. عبد الله ميرغني الطيب

ع/ المؤلفين

قوتنجن، 16 سبتمبر 2002

مقدمة

برز علم نمو الغابات (Forest growth) كمجال قائم بذاته في بداية الثمانينات من القرن العشرين بعد ان كان يمثل جزءاً من علم الإدارة الفنية للغابات (Forest management) ثم فرعاً في علم دراسة إنتاجية الغابات(Forest yield science).

هنالك حاجة مستمرة للمعلومات عن نمو الأشجار وإنتاج الأخشاب من المشاجر الغابية وذلك للإستفادة منها في عمليات التخطيط الغابي. يعمل التخطيط الغابي على مقارنة البدائل الفلاحية للمشاجر الغابية الحقيقية وتعتمد هذه المقارنة في المقام الأول على القدرة بالتنبؤ بنمو الأشجار(Growth prediction) وتفاعلها مع مختلف أنواع التخفيف (الشلخ) في الغابة.

تعتمد خطط الإنتاج للأغراض الصناعية علي التنبؤ بالكميات المتوقعة من الإنتاج الخشبي لمختلف المناطق وكذلك الاصناف التي ستحتاجها الصناعات الخشبية في المستقبل وذلك ضماناً لإستدامة الإمداد بالمواد الخام اللازمة للصناعة، أما على مستوى التخطيط العمراني فإن إدارات البلديات تحتاج للتنبؤ بالزيادة التي تحدث في فروع وجذور الأشجار التي تنمو على الطرق وفي المنتزهات لمعرفة تأثيرها على الطرق وشبكات إمداد وتصريف المياه وشبكات الكهرباء والهاتف بالإضافة لتأثيرها على مناسيب المياه السطحية والجوفية، والعمل على تجنب المخاطر التي يحتمل حدوثها. من جهة ثالثة يحتاج علم بيئة الغابات الى نماذج رياضية تعبر عن النمو وذلك بهدف معرفة تأثيرات تبادل المواد والتغيرات المناخية، وتساعد مثل هذه النمازج الرياضية (في كثير من الأحيان) على إتخاذ بعض القرارات السياسية في البلدان المتقدمة. يعتبر توفير المعلومات التي تساعد على تصميم النماذج الرياضية لنمو الأشجار من المهام الاساسية للبحوث الخاصة بنمو الغابات.

تحاول بحوث النماذج الرياضية في علم نمو الغابات تحديد الطرق المثلى لجمع البيانات والمعلومات وتطوير إمكانيات التنبؤ وتحديد القوانين الأساسية التي تحكم ديناميكية الغابة، وذلك إعتماداً على تجارب بحثية في أماكن ثابتة (Permanent sample plots) تكرر فيها القياسات بين الحين والاخر. تعتبر مثل هذه المسائل مهمة بالنسبة لكل منطقة بسبب التباين الطبيعي الموجود بين مختلف المناطق الغابية.

تهدف محتويات هذا الكتاب الى إلقاء الضوء على البيانات المحيطة بمواقع نمو الأشجار والتأثيرات المعقدة لعناصر الموقع على نمو ومورفلوجيا الاشجار الغابية وذلك بهدف التحديد الدقيق للإنتاج الخشبي ووصف تركيبة المشجر والتغيرات التي تحدث نتيجة لقطع الأشجار كأساس لتنبؤ يكون قريبا من الواقع ويساعد على وصف تطور الأشجار المفردة (Single trees) والمشاجر (Forest stands) والمناطق الغابية (Forest regions) بكاملها.

نظرا لصعوبة كتابة المعادلات الرياضية بالحروف العربية فقد لجأ المؤلفان الى إستعمال الرموز والحروف اللاتينية وذلك لأن الرياضيات لغة مشتركة بين كل لغات العالم .

يعتبر هذا الكتاب بداية لعرض أساسيات علم نمو الغابات وستتبعة كتب أخرى تتعرض لتفاصيل أكثر بمشيئة الله.

والله ولي التوفيق.

جدول المحتويات
محتويات الكتاب

1. أساسيات علم نمو الغابات	1
1.1. البيئة المحيطة بموقع نمو الأشجار	2
1.1.1. الإشعاع الضوئي	2
1.1. 2. الحرارة	8
1.1. 3. الماء	11
1.1. 4. الهواء	14
1.1. 5. المحتوي الغذائي	15
1. 2. تصميم النموزج الرياضي للظروف المحيطة بالموقع	17
2. المشجر كمعيار لقياس درجة جودة الموقع	21
تصنيف درجة جودة الموقع في غابات القطع الكلي	21
التصنيف النسبي عن طريق الإرتفاع	22
التصنيف المطلق عن طريق الإرتفاع	23
مؤشرات الموقع بإستخدام متوسط الزيادة السنوية الكلية	28
مستوى الإنتاج الخشبي	28
التصنيف الديناميكي لدرجات جودة الموقع	29
التصنيف في مشاجر متعددة الأعمار	29
2.2. تصنيف جودة الموقع عن طريق عناصره	30
عنصر التربة	30
الغطاء النباتي التحتي	31
المناخ	34
3. مورفلوجيا الأشجار الغابية	35
3. 1 التاج	37
3. 2 الساق	44
معامل الشكل	44
ثابت الشكل والإنتفاخ	45
معادلة برينك المعدلة	46
النماذج الرياضية الموحدة للساق	47
3.3. الجذور	49
4. كثافة وتركيبة المشجر.	52
1.4. كثافة المشج	52
1.1.4. المساحة القاعدية للمشجر	52
2.1.4. مؤشر كثافة المشجر	53
3.1.4. المسافات النسبية بين الأشجار	54
4.1.4 معامل لتنافس التاجي	55
2.4. التغطية التاجية	55
1.2.4. الجزء المئوي للمساحة القاعدية	55
2.2.4. مؤشر بالمواد (BALMOD	56
3.2.4. مؤشر C66	57
4.2.4. مؤشر المساحة القاعدية– القطر	59

3.4. الكثافة الشجرية في نقطة محددة 59
1.3.4. مساحة التداخل (التعدي) 59
2.3.4. النسبة الرابطة بين الأقطار والمسافا البينية 61
3.3.4. المسافات الطبغرافية والإيكولوجية للشجرة 63
4.4. التركيبة البسيطة: التكرارات التوزيعية لصفات الأشجار. 63
5.4. التركيبة المكانية– التوزيع المكاني. 68
1.5.4. جزئيات الأنواع والأحجام 68
2.5.4. عناصر التركيبة المكانية 70
3.5.4. تكرار التركيبة الغابية 71
4.5.4. التركيبات المكانية الحقيقية والمتوقعة 72

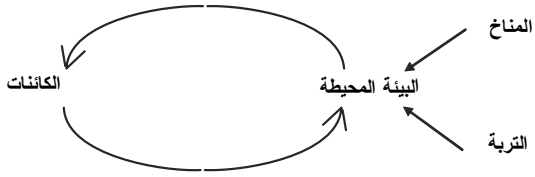
5. نمو المشاجر النقية متساوية الأعمار 74
1.5. جمع المعلومات 74
1.1.5. مرابيع العينة الدائمة 74
2.1.5. الصفوف الزمنية غير الحقيقية 75
3.1.5. مساحات تكرار القياس 76
2.5. النماذج الرياضية للإنتاج 78
1.2.5. الإنتاج الكلي، المتوسط الكلي للزيادة السنوية، الزيادة السنوية الحالية 78
2.2.5. جداول الإنتاج النموذجية 80
3.2.5. النماذج الريضية للإنتاج 82
3.5. النماذج الرياضية لنمو الأشجار التي تعتمد على الكثافة الشجرية 84
العلاقة بين الكثافة الشجرية للمشجر والنمو 85
أمثلة لنماذج رياضية للمشاجر ذات الكثافات الشجرية المتعددة 85
1.3.5. نموذج نمو لمشاجر الصنوبر (Spruce) 88
2.3.5. حجم وتصنيف المخزون الخشبي بالمشاجر 90
6. نمو الأشجار المفردة 93
1.6. النماذج التي لا تعتمد على الموضع 93
1.1.6. حساب تطور التوزيعات القطرية 94
2.1.6. الطريقة المبسطة لحساب تطور الأقطار 96
3.1.6. التغير في المساحة القاعدية النسبية 97
4.1.6. النمذج الرياضية الإنتقالية 98
5.1.6. طريقة الحساب المباشر للزيادة 100
6.1.6. حساب الزيادة عن طريق تحليل الإنحدار 102
7.1.6. المراجعة الدورية لمعلومات الحصر 103
2.6. النماذج الرياضية التي تعتمد على مواضع لأشجار 105
1.2.6. إستخدام الإطار النظري لتحديد مواضع الأشجار 105
2.2.6. النماذج الرياضية (WASIM) و(MOSES) 109
3.2.6. النموذج الرياضي (SILVA) 111

7. النماذج الرياضية للعمليات الغابية 113
1.7 الوصف التقليدي لعمليات لتخفيف 113
2.7. التخفيف (الشلخ) في الغابات النقية متساوية الأعمار 115
العلاقة بين عدد الأشجار والمساحات القاعدية 115

ثابت التمايز أو الفصل 119
التطور الأمثل للغابة 120
المسافات البينية الحرجة والإنتماء 122
3.7. وصف عمليات التخفيف عن طريق ثوابت تركيبة المشجر 123
تحليل عملية التخفيف (الشلخ) عن طريق مجموعات الأشجار المتجاورة 124
تصميم نمذج رياضية للتخفيف بناءاً على نظم معينة 125
التأكد من الحاجة للتخيفيف 127
التنبؤ بالتخفيف إعتماداً على حالة محددة 128
8. النماذج الرياضية للمساحات الصغيرة 128
التجدد 129
موت الأشجار 131
المراجع 133

1. أساسيات علم نمو الغابات:

تعرف الغابات على أنها نظام بيئى على علاقات متبادلة مع الكائنات الحية والطبيعية غير الحية المحيطة بها. يعتبر نمو الأشجار تفاعلا معقدا مع تأثيرات خارجية متنوعة للحد الذي جعل علم نمو الغابات يهتم بشكل متزايد بالبحوث في مجال النظم البيئية. من هنا يأتي فهم التأثيرات الطبيعية والإجتماعية (المجتمعات الشجرية) على مجريات النمو، ومن ثم تأثير ذلك أيضا على علم نمو الغابات. تعتبر المؤثرات العضوية وغير العضوية من العوامل الطبيعية ذات الاثر الكبير على البيئة المحيطة بالنظام البيئي الغابى، كما يعتبر المناخ والمواد المعدنية بالتربة أهم هذه العناصر. يمكن وصف بيئة الكائنات عن طريق العناصر الفيزيائية والكيميائية. يحدد المناخ والمواد الغذائية وإرتباطهما بالكائنات الموجودة الحالة الفيزيوكيميائية لبيئة الكائنات. الشكل (1.1) يوضح ذلك.



الشكل (1.1): العلاقة المتبادلة بين الكائنات وبيئتها

تأخذ الكائنات الحية الطاقة والمواد الغذائية وتعطيها للبيئة المحيطة مشكلة بذلك ما يعرف بإنتاج وإستهلاك الطاقة والمواد (هاينرش، 1995). تنتج الكتلة النباتية من عملية الإنتاج الأولية (التمثيل الضوئي). في أثناء عملية التمثل الضوئي تحدث عدة تفاعلات تحتاج إلى طاقة من الخارج.

$$CO_2 + H_2O + xM^+ + yA^- + (y\text{-}x)H^+ + \text{حرارة} \rightarrow CH_2OMxAy + O_2$$

عن طريق التنفس وإستهلاك المادة الغذائية ينعكس إتجاه العملية ويتم تكسير المادة العضوية عن طريق الاكسجين وتنطلق الطاقة مرة أخرى في شكل حرارة.

$$CH_2OMxAy + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + xM^+ + yA^- + (y\text{-}x)H^+ + \text{حرارة}$$

وفي الختام تتحول المواد العضوية الى مواد معدنية. من هنا يتضح أن الغلاف الجوي والغلاف المائي يوفران البيئة المناسبة لنمو الاشجار.يمكن النظر الى هذه البيئة المحيطة على انها أوساط تفاعل تؤخذ منها المواد وتعطي. من المؤثرات الأخرى هنالك أيضا التغيرات المناخية، وفي مقدمتها التأثيرات الغابية. يعتبر الحصول على معلومات عن هذه التأثيرات من الأهداف المهمة للبحوث الخاصة بعلم نمو الغابات. تستخدم المعلومات المكتسبة في التخطيط الغابى كما تستخدم أيضا في حساب كميات الأخشاب المتوقعة لمختلف الإستخدامات، بما في ذلك الصناعات الخشبية. تشكل هذه المعلومات جزءا مهما في تطور المعرفة في مجال بيئة الغابات ووضع دعامات إتخاذ القرارات.

تمثل البحوث في علم نمو الغابات جزءاً من البحوث في البيئة الغابية. تتأثر كل البحوث الغابية الحديثة بالأعمال العلمية التي قام بها العالم الألماني متشرلش (1971– 1975) وأورليش (1986) والينبيرج (1986). تستفيد البحوث الخاصة بنمو الغابات من المعرفة البيئة المتاحة وتسهم من جانبها بالطرق والنماذج الرياضية التي تسمح بالتعبير عن نمو الغابة. من الضروري أيضا معرفة التأثيرات المناخية والإقتصادية السائدة الآن لها أثرها في النمو المستقبلى للغابات. تتطلب الإستجابة والتفاعل مع هذا الأمر تصميم نماذج رياضية عن نمو الغابات تعتمد على تراكم معلومات تم جمعها في الماضي. هنالك حاجة ماسة لمعلومات عن تطور وتركيبة الغابات، ولكنها (للأسف) غير متوفرة حتي الآن بالشكل المتكامل.

يهتم علم نمو الغابات الحديث بالحساب المستقبلي لنمو الغابات (Prediction) وذلك عن طريق النماذج الرياضية(Mathematical Models) ومعادلات الحساب المتواتر(Algorithm) . يتم تحديد معالم النماذج الرياضية عن طريق تحديد الهدف من النموذج الرياضي ونوع المعرفة المطلوب الحصول عليها.
بهذا يمكن تصميم نماذج رياضية لنمو الأشجار المفردة (Single Tree Models) أو المشاجر الغابية (Stand Models) على اساس الكتلة الحية المنتجة أو الأنواع المتاحة من الإنتاج ونسب الأنواع الشجرية (التركيبة الشجرية للمشجر) ودرجة التنافس، كما يمكن تصميم نماذج رياضية قصيرة أو طويلة الأمد.
تغطي الفقرات التالية الظروف البيئية المحيطة بالموقع وتأثيراتها على عملية التمثيل الضوئي. يمكن الحصول على معلومات أخرى من الكتب المتخصصة في هذا المجال. سيتناول هذا الفصل أمثلة تفسير تطور مختلف مكونات النظام الغابي وتكاملها على هيئة نماذج رياضية تصف النمو الغابي.

1.1. البيئة المحيطة بموقع نمو الأشجار:

يمكن تقسيم البيئة المحيطة بالأشجار الى قسمين هما المناخ والتربة. يحدد المناخ عن طريق عوامل معقدة هي الإشعاع الضوئي والحرارة وكمية ثاني أكسيد الكربون في الهواء والأمطار. لمعرفة هذه التأثيرات يتحتم وصف عمليات التبادل بين الغلاف الجوي والغلاف المائي في أشكاله المختلفة . غازات، جزيئات ماء، مواد ذاتية وطاقة. هذه العمليات التبادلية تشكل الشروط الأساسية لعملية نمو الأشجار.

1.1.1. الإشعاع الضوئي:

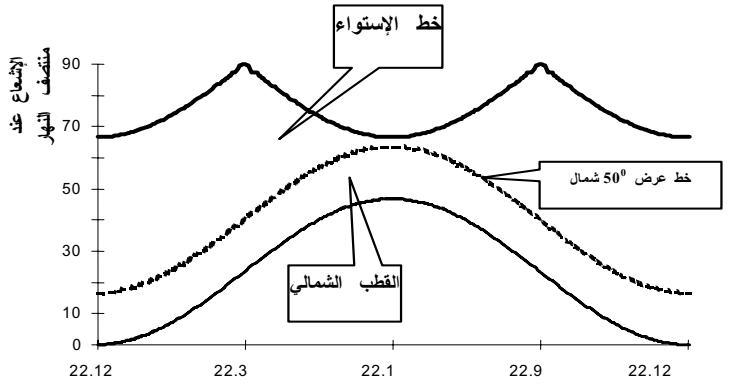
يفهم من الإشعاع الضوئي ما ذكره فان آمرن وهايكل (1984) بأنه عملية إنتقال طاقة بين جسمين أو سطحين. تعتبر الأشعة الإلكتروماغنطيسية الواردة من الشمس ذات موجات قصيرة وتشمل الأشعة البنفسجية والاشعة المرئية تحت الحمراء. في إطار البحوث الخاصة بنمو الغابات هنالك إهتمام بكمية الإشعاع الساقطة على سطح الأرض وعلى النباتات من ناحية، والجزء من الإشعاع الذي يسهم في عملية التمثيل الضوئي وهو الجزء المعروف بالإشعاع النشط في عملية التمثيل الضوئي (Photosynthesis) من ناحية أخرى. ترسل الشمس 42^{26} جول في الثانية تصل منها الى الغلاف الجوي المحيط بالارض حوالي 8,4 جول للسنتمتر المربع في الدقيقة وتعرف هذه القيمة بالثابت الحراري. الجزء الذي يصل الى سطح الأرض من هذه الكمية يمثل حوالي 47% ويعرف بالإشعاع الكوني، الذي يتكون من الإشعاع الشمسي والإشعاع القادم من السماء والإشعاع المنعكس من الارض. يرجع فاقد الإشعاع الى الإمتصاص والإنعكاس والتشتت أثناء عبور الأشعة للغلاف الجوي.
فيما يتعلق بنمو الأشجار فالمهم هو الإنتاج المرتبط بالضوء، أي درجة تغير الطاقة الإشعاعية الى طاقة كيميائية عبر عملية التمثيل الضوئي. معرفة كمية الإشعاع التي يتم إمتصاصها عبر أوراق الأشجار الشرط الاساسي لتحديد كمية الإنتاج المرتبط بالتمثيل الضوئي. لتصميم النموذج الرياضي لنمو المشاجر الغابية يجب أخذ هذه القيمة بكل تغيراتها اليومية والسنوية. هنالك عدد من الطرق التي تستخدم لحساب الإشعاع النشط في عملية التمثيل الضوئي كما توجد معادلات خاصة تصف الإشعاع النشط وإرتباطه بإرتفاع الشمس. يتم تحديد إرتفاع الشمس عبر خطوط العرض الجغرافية والوقت من اليوم وميلان الشمس.
يعرف إرتفاع الشمس بزاوية موضع الشمس من الجزء من الأرض الذي تسقط عليه الأشعة: كلما كبرت هذه الزاوية، كلما كان الطريق قصيراً وبالتالي كلما قل الفاقد من الأشعة تكون الشمس في منتصف النهار في أعلى موضع لها، وهذا يعني أن زاويتها على السطح الذي تسقط عليه الأشعة كبيرة وكمية فاقد الأشعة التي تضيع في الغلاف الجوي تكون قليلة. كلما قل إرتفاع الشمس، كلما ذاد الفاقد من من أشعتها. يمكن حساب إرتفاع الشمس حسب المعادلة (1.1):

$$\sin(ß)s=\sin(LAT) \cdot \sin(Dekl) + \cos t(LAT) \cdot \cos(Dekl) \cdot \cos(15.(Std - 12)) \quad (1.1)$$

حيث:

$\sin(ß)$ = إرتفاع الشمس، أي زاوية موقع الشمس على المنطقة الساقطة عليها الاشعة
LAT = خط العرض
Std = الساعة (من اليوم)

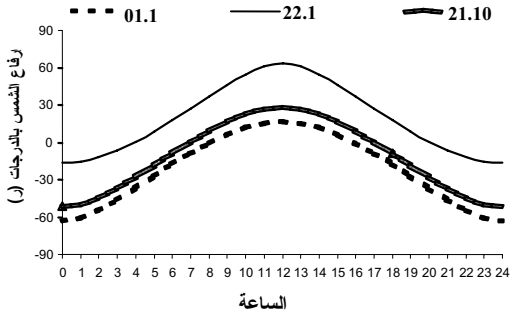
ميلان الشمس، أى الزاوية المحصورة بين الشمس ومستوى دوران الأرض Dek1 =
بإستخدام المعادلة (1.1) يمكن حساب إرتفاع السمش حسب ساعات اليوم وفصول السنة لمختلف خطوط العرض.
الشكل (1. 2) يوضح على سبيل المثال تغيرات أرتفاع الشمس أثناء السنة لثلاثة خطوط عرض مختلفة.



الشكل (1. 2): إرتفاع الشمس أثناء السنة في خط الإستواء وفي خط عرض 50 شمال وعلى القطب الشمالي عند الساعة 12 منتصف النهار (إ = الإشعاع عند منتصف النهار).

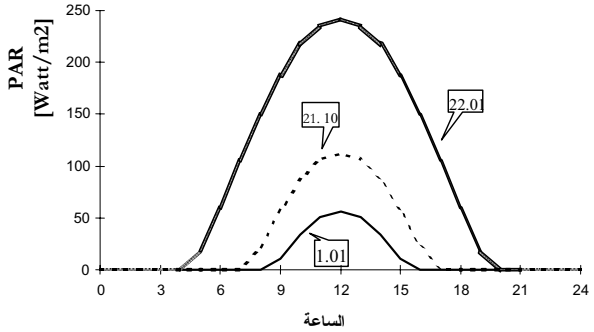
يوضح الشكل (1. 3) تغير إرتفاع الشمس خلال ساعات اليوم لخط العرض 50 في ثلاثة أيام مختلفة من ايام السنة. ينتج الإشعاع النشط لعملية التمثيل الضوئي من الجزء الفعال من الإشعاع (حوالي 47%) والذي ينخفض في حالة وجود سحب أو إمتصاص جوي للأشعة (المعادلة1. 2).

$$PAR = 2360 \cdot 0.47 \cdot WOLK.\sin(ß).e^{-0.15/\sin(ß)} \qquad (2.1)$$



الشكل (1. 3): تغير إرتفاع الشمس خلال ساعات اليوم لخط عرض 50 في 3 أيام مختلفة من السنة (ر= إرتفاع الشمس بالدرجات).

بناء على ما ورد في الشكلين (1. 2) و(1. 3) فيما يتعلق بإرتفاع الشمس يمكن تحديد الإشعاع لاي يوم و لاي ساعة فيه. الشكل (1. 4) يوضح نتيجة حساب ثلاثة أيام مختارة وقد أخذت قيمة ثابتة للغطاء الحسبي مقدارها 0.5



الشكل (1. 4): الإشعاع النشط أثناء اليوم لثلاثة أيام مختلفة من أيام السنة.

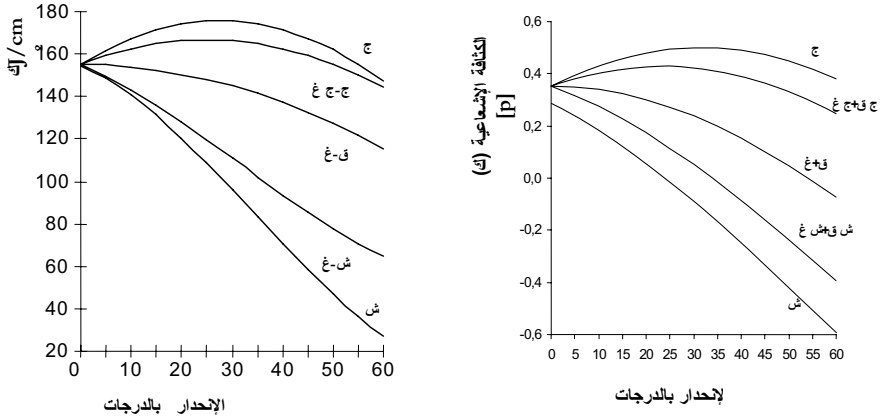
بإستخدام معادلات هذا النظام يمكن حساب مكونات الإشعاع في إطار تصميم النماذج الرياضية للنمو. يمكن حساب كمية الإشعاع النشط عن طريق تكامل الإشعاع اللحظي لاي يوم أو مكان في النصف الشمالي من الكرة الارضية.
يشكل حساب كمية الإشعاع بديلاً للنماذج الرياضية لحساب النمو في مواقع الغابات. تمكن أليسوف وآخرون (1956) من إنشاء علاقة تربط بين إنحدار الموقع وإتجاه تعرضه للاشعة وذلك وفقا للمعادلة (1. 4).

$$P= \cos(LAT-20.4) \cdot \cos(ß) + \sin(LAT-20.4) \cdot \sin(ß) \cdot \sin(\alpha) - 0.5 \qquad (3 .1)$$

حيث:

تغير الكثافة الإشعاعية	P =
خط العرض الجغرافي	LAT =
إنحدار الموقع	ß =
تعرض إتجاه الموقع للأشعة الشمسية	α =

الشكل (1. 5) يوضح المقارنة بين القياسات التجريبية والحساب النظري لكميات الإشعاع وفقاً للمعادلة أعلاه. المهم في هذا الشكل هو إتجاه مسار المنحنيات ومواضعها وليس المقارنة بين القيم.



الشكل (1. 5) الإشعاع الذي تم قياسه عملياً (الى اليسار) خلال فترة الإنبات في منطقة قوتنجن والإشعاع الذي تم حسابه بإستخدام النموذج الرياضي محتويا على التعرض للأشعة والإنحدار وكثافة الإشعاع حسب معادلة أليسوف و آخرون(1956) لخط العرض 52 شمال (ك= الكثافة الإشعاعية، ش،ج، ق،غ= الإتجاهات).

تنخفض كثافة الإشعاع الساقطة على الغطاء التاجي للمشجر نتيجة لضياع الضوء في الطبقات الدنيا لتيجان الأشجار. يمكن التعبير عن هذه العملية المعقدة بإستخدام معادلات القوى (الأس) المبسطة وفقاً لما يعرف بقاعدة لامبيرت – بير. يمكن حساب الضوء الضائع بإستخدام المعادلة (1. 4).

$$I_z = I_{0\,.\,e^{-k.F_z}} \qquad (4.1)$$

حيث:

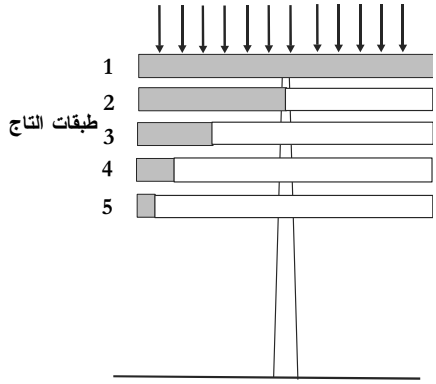
1_z= كثافة الإشعاع في الطبقة التاجية

1_0= كثافة الإشعاع في منطقة خالية من الأشجار

K= ثابت (يعبر عن الضو الضائع نتيجة للتشتت).

F_z= المؤشر التراكمي لاوراق الأشجار في الطبقة التحتية.

قسم بوسل (1992) منطقة التاج الى خمس طبقات (الشكل 6.1)



الشكل (6.1) الضياع التدريجي للضوء حسب مقترح بوسل (1992).

كمية الإشعاع الضوئي المتاحة في الطبقة التاجية الثالثة مثلاً تساوي 25% من كمية الإشعاع الساقطة على التاج.
يعتمد التوزيع الضوئي القادم من أعلى (في المشجر) على حجم الكتلة العليا وعلى مؤشر مساحة أوراق الأشجار.
يبدأ هذا في الجزء الأعلى من تيجان الأشجار ثم يتناقص تدريجياً نحو الأسفل، لهذا فإن تدرج الضوء ليس خطياً وإنما تناقصيا.
يتأثر توزيع الضوء بتغير فصول السنة، كما يتأثر بالنوع الشجري والمعاملات الفلاحية التي تطبق في المشجر.
في فصل الصيف، عندما تكون الأشجار عريضة الأوراق ممتلئة بأوراقها تكون الكثافة الإشعاعية بين الجزئين الأعلى والاسفل من التاج قوية وتقل عند سقوط الاوراق. بالنسبة لنفس النوع الشجري يمكن أن يتأثر تشتت الضوء الى حد كبير بنوعية القطع (التخفيف) الذي يحدث في الغابة.
تفيد مثل هذه المعلومات في معرفة نمو الشجرة إعتمادا على عملية التمثيل الضوئي. إستخدم سيفانين (1993) المعادلة (5.1) أدناه لحساب زيادة النمو في الشجرة عن طريق التمثيل الضوئي لاشجار الصنوبر (*Picea abies*)

$$P = 0.8 \,.\, (0.003 \,.\, PAR) \qquad (5.1)$$

حيث:

P =الناتج من عملية التمثيل الضوئي لشجرة الصنوبر (من المادة الجافة بالكيلوجرام في السنة)
PAR =كمية الإشعاع النشط الذي تمتصة شجرة الصنوبر (م جول في السنة)

من هنا يتضح أنه يمكن حساب النمو وعن طريق التمثيل الضوئي الأقصى والذى يساوى 0.003 كيلو جرام من المادة الجافة في المليجول طاقة إشعاعية مع الأخذ في الإعتبار أن الفاقد من الكتلة الحية نتيجة لعملية التنفس يقدر بحوالي 20%.
الشكل (7.1) يوضح العلاقة بين الإنتاج المرتبط بالضوء والإشعاع النشط في عملية التمثيل الضوئي. عندما يبلغ التمثيل الضوئي أعلى مدى له يحدث ما يعرف بالتشبع الضوئي ويكون هذا في الأوراق المعرضة للضوء أعلى منه في الأوراق الموجودة في الظل ، كما يكون في بداية فترة الإخضرار أعلى منه في نهايتها.
تعرف نقطة تقاطع المنحنى الضوئي مع المحور السينى (الشكل 7.1) بنقطة التعويض الضوئى ويمكن تعريفها على أنها كمية الإشعاع التي يكون فيها سحب ثاني أكسيد الكربون مساوياً في كميته لكمية ثاني أكسيد الكربون الناتج. يحدث هذا على سبيل المثال في الصباح الباكر وفي المساء عندما تكون الكثافة الضوئية ضئيلة كما في الجزء الأسفل من الناتج. تقع نقطة التعويض الضوئي في الأشجار المحبة للضوء (Light demanders) أعلى منها في الأشجار المتحملة للظل (Shade bearers) وفي الإشجار الصغيرة أقل منها في الأشجار الكبيرة (من نفس النوع الشجري) . يفسر هذا قدرة الأشجار الصغيرة على النمو تحت غطاء الأشجار الأكبر. كذلك نجد أن

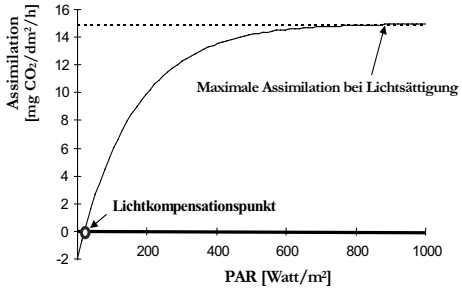
نقطة التعويض الضوئي في الأوراق المعرضة للضوء أعلى منها في الأوراق الموجودة في الظل (كرامر، 1988).
يمكن وضع العلاقة العامة بين الإستفادة التحويلية والإشعاع النشط في شكل معادلة كالاتي:

$$ASSI = \max ASSI[1 - e^{-k(PAR - PAR_0)}] \qquad (6.1)$$

حيث:

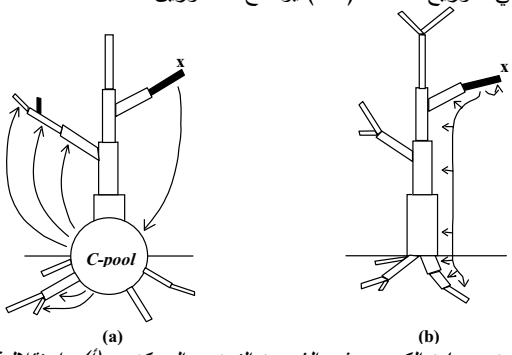
ASSI =الأستفادة التحويلية (ملغرام من ثاني أكسيد الكربون في واحد ديسيمتر مربع في الساعة)
maxASSI =الإستفادة التحويلية

يوضح الشكل (7.1) مثالاً لمنحنى تفاعل ضوئي. تبلغ قيمة (K) في المثال 0.0061 وتبلغ قيمة (PAR_0) 20 واط في المتر المربع والقيمة القصوى للتمثيل تبلغ 15 مليجرام من ثاني أكسيد الكربون في الديسيمتر المربع في الساعة.



الشكل (7.1): مثال منحنى تفاعل ضوئي مع نقطة التعويض الضوئي.

إبتكر فانغ وجارفس (1995) طريقة لحساب التفاعل الضوئي مع نقطة التعويض الضوئي، إلا ان طريقتهما تعتبر مكلفة جداً، إذ إعتمدا فيها على 52 شجرة في مشجر وقد إستخدما أولاً نموذج رياضي للتاج لحساب سطح الأوراق ثم عملا على قياس الإشعاع الضوئي النشط في كل ساعة وفي النهاية قاما بحساب معدلات النتح والتمثيل الضوئي كلاً على حدة لكل من الأوراق الموجهة للضوء وتلك التي في الظل.
عند تصميم النماذج الرياضية لناتج التمثيل الضوئي تبرز المسألة المركزية المتعلقة بميكانيكية التوزيع، أي توزيع المنتج (الغذائي) على أجزاء النبات المختلفة. يرى كورت(1998) تصورين للتوزيع، إحدهما يتم مركزيا والآخر يعطي الفروع استقلاليتها في التوزيع. الشكل (8.1) يوضح التصورين.

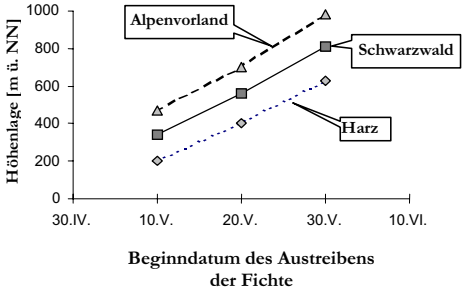


الشكل (8.1): توزيع مادة الكربون في الشجرة التوزيع المركزي (أ) وإستقلالية الفروع(ب).

في التصور المركزي للتوزيع توزع المنتجات التي قام بإنتاجها الفرع (س) بعد تحويلها للمجمع المركزي (المستودع) لكل أجزاء الشجرة. أما في التصور الثاني فإن الإنتاج الذي يصنعه الفرع (س) يستغله هو والأجزاء المرتبطة معه (بالتحديد تلك التي الى أسفل منه).
عند تقويم النماذج الرياضية للعمليات الحيوية يجب مراعاة ان نمو الشجرة يعني اكثر بكثير من مجرد الزيادة في الكتلة الحية. تملك الأشجار القدرة على التفاعل مع الظروف البيئية المحيطة بها. تنعكس هذه القدرة في عدة أشكال كالتغير في الخلايا والتركيبات النسيجية والتغيرات في مختلف الأعضاء والتي تظهر أثناء حياة الشجرة وهي تنمو. مازال هنالك الكثير من المؤثرات، والتي لم تعرف بعد، تؤثر كثيراً على النمو للدرجة التي تجعل من النماذج الرياضية المستخدمة حالياً مجرد تقديرات تقريبية (على الأقل حتى الآن).

2.1.1. الحرارة

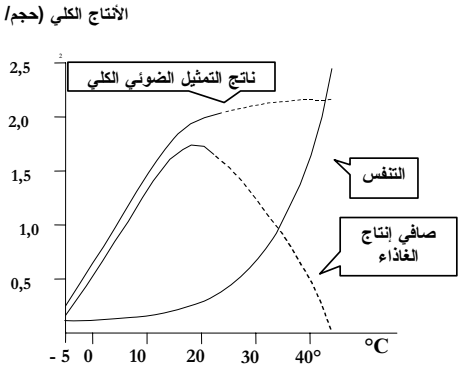
يتحول الجزء الأكبر من الإشعاع الذي يتم إمتصاصه الى حرارة. الأهم من الناحية الإيكولوجية ليس فقط كمية الحرارة الساقطة على الارض أو الجسم، وإنما الحالة الحرارية للجسم المسلط عليه الاشعاع، بمعنى آخر درجة حرارته. تتغير درجة حرارة الجسم إعتماداً على الطاقة الحرارية التي يتلقاها. الذي يهمنا بشكل خاص في البحوث المتعلقة بعلم نمو الغابات، هو مسار العام فيما يتعلق بدرجات الحرارة وتأثيرها على المنتج الضوئي (الناتج من التمثيل الضوئي). تؤثر الحرارة خلال العام على بداية النمو الخضري للأشجار ومدة إستمراره. الشكل (9.1) يوضح هذه العلاقات في مناطق الهرز وفي الغابة السوداء وفي منطقة الألب بألمانيا. يزيد تاريخ إستئناف النمو بمعدل 3.8 يوميا عند كل زيادة في الإرتفاع من سطح الأرض مقدارها 100 متراً .



الشكل (9.1): تاريخ بداية إستئناف النمو للنوع (Picea abies). في إرتفاعات مختلفة (الهارز والغابة السوداء ومنطقة الألب) بألمانيا (ر= الإرتفاع من الأرض، ل= منطقة الألب، غ= الغابة السوداء،هـ= منطقة الهارز).

لقد ثبت من خلال عدد من التجارب أن بداية استئناف نمو الأشجار (في المناطق الباردة) لا يعتمد على كمية الضوء المتاحة، وإنما يعتمد على على درجة الحرارة بشكل كامل . يبدأ ظهور الأوراق الجديدة في اليوم الجديد من اليوم الذي تتجاوز فيه درجة الحرارة القيمة الحرجة، وهذه القيمة غير ثابتة، ولكنها لحظة تحدث في وقت ما. توضح البحوث التي أجريت في هذا المجال خصائص محددة للمستويات الحرارية في المشاجر الغابية. يعتمد توزيع درجة حرارة الهواء (الى حد كبير) على نوع عملية التخفيف (في السودان بعملية الشلخ). في غابات الصنوبر التي لم يتم تخفيفها تكون درجة الحرارة أثناء اليوم في حدها الاعلى، وحالة التخفيف المكثف تكون متوسطة الى منخفضة مع تأثير مماثل على التربة (تسخين التربة). في الغابات ذات الأشجار عريضة الأوراق تكون درجة الحرارة على سطح التربة اعلى منها في منطقة تيجان الأشجار وينعكس هذا الوضع عقب ظهور الأوراق.
يتوافق إرتفاع درجة الحرارة في العادة مع زيادة نشاط الإنزيمات والتي تؤثر مباشرة في عملية التمثيل الضوئي. فيما يتعلق بعمليتي التصنيع والإستهلاك الغذائي فأن المدى المناسب للحرارة بالنسبة للنباتات العليا يقع بين 25 و30 درجة مئوية ويقع الحد الأدنى بين صفر و5 درجات والأعلى بين 40 و50 درجة مئوية. تتفاوت ردود فعل النباتات حسب المناطق المناخية ، فنجد أن النباتات في المناطق الصحراوية تحتمل درجات حرارة تتجاوز 40

درجة مئوية لعدة سنوات وفي الجانب الآخر نجد نباتات تستطيع أن تنمو في درجة حرارة صفر مئوية لعدة سنوات.
في المناطق المناخية نفسها يمكن برهات تأثير درجة الحرارة على معدل التمثيل الضوئي، بمعنى أنه بإرتفاع درجة الحرارة تزيد حصيلة التمثيل الضوئي. في نفس الوقت يزيد معدل التنفس مع إرتفاع درجة الحرارة، والتي تعمل بدورها على زيادة إستهلاك الغذاء. الشكل (10.1) يوضح هذه العلاقة مستشهداً بمثال.



الشكل (10.1): تأثير الحرارة على الإنتاج الكلي للغذاء والتنفس وصافي إنتاج الغذاء.

هنالك علاقة معقدة بين مختلف العناصر التي تؤثر في التمثيل الضوئي. لقد ثبت من خلال العديد من التجارب أنه من غير الممكن التحدث عن التأثير الإيجابي لارتفاع درجة الحرارة لوحدها عندما تكون قوة الإضاءة والرطوبة النسبية في حدهما الأدنى. فقد ثبت أنه في مدى درجة الحرارة بين 8و 24 مئوية وقوة إضاءة ضعيفة ورطوبة نسبية منخفضة للهواء (30%) أن إنتاج الغذاء كان ضعيفاً مع أن درجة الحرارة كانت جيدة. عندما ثبتت درجة الحرارة وإرتفعت الرطوبة النسبية وشدة الإضاءة زاد إنتاج الغذاء بشكل ملحوظ.
ذكر كرامر (1988) أن إجمالي الإنتاج والإستهلاك الغذائي يرتبطان بدرجة الحرارة بشكل يختلف عن إرتباطهما بالعناصر المناخية الأخرى التي ورد ذكرها. تجدر الإشارة الى ان عناصر المناخ تحتوي أيضا على الماء والمواد الغذائية والتي تعتمد هي الأخرى على معدل النتح وحركة الماء داخل الشجرة والجزء المتاح من الماء للشجرة داخل الأرض. يضاف الى ذلك الإختلافات النوعية الواضحة فيما يتعلق بتأثيرات الحرارة على إستهلاك الغذاء أثناء ساعات اليوم و خلال العام. لقد روعى عنصر الحرارة وتغيره في المدى القصير والطويل في البحوث المتعلقة بتصميم النماذج الرياضية التي تصف نمو الغابات.من الممكن هنا ذكر مثال وهو النموذج الرياضي الذي قام بتصميمه بوسل (1994) ويعرف بالنموذج TREEDYN 3 .
إهتم هذا النموذج باهم العناصر التي تؤثر في التطور الديناميكي للشجرة (كنظام)، وقد بني على ان العمليات الإيكوفسيولوجية الأساسية لكل الأنواع الشجرية في مختلف مواقع متشابهة (بشكل عام). لهذا السبب فإن النموذج TREEDYN 3 قد بني على قاعدة تجعل منه نموذجاً عاماً . بتحديد فهم ثوابت النموذج الرياضي لكل حالة يمكن جعله نموذجاً خاصاً لتلك الحالة. طور بوسل (1994) المعادلة الآتية لحساب متوسط درجة حرارة الهواء (T) لاي يوم من أيام السنة.

$$T = T_{avg} + \frac{T_{amp}}{2} \cdot sin\left[2\pi\left(t_s - \frac{1}{12}\right) - \frac{\pi}{2}\right] \qquad (7.1)$$

حيث:

T = متوسط درجة الحرارة اليومي
T_{avg} = متوسط درجة الحرارة السنوية
T_{amp} = إنحراف متوسط درجة الحرارة من الفرق بين أبرد واحر شهرين في السنة
t_s = التوقيت الموسمي

كما ذكر آنفا فإن معدل التنفس يتناسب طردياً مع درجة الحرارة. بالرجوع الى بوسا (1994) يمكن التعبير عن تأثير درجة الحرارة على التنفس (بالتقريب) بإستعمال المعادلة الآتية:

$$k_{Tr} = \begin{cases} \left(\frac{T - T_0}{T_n - T_0}\right)^2, if T_0 \le T \le 40°C \\ 0\ , sonst \end{cases} \qquad (8.1)$$

حيث:

K_{tr} = تأثير درجة الحرارة على التنفس

T = درجة الحرارة الحقيقية

T_0 = ادنى درجة حرارة للتنفس

T_n = درجة الحرارة التي عند حدوثها تكون قيمة (K_{tr}) =واحد (درجة النشاط الطبيعي)

على هذا النسق من الممكن الآن حساب تأثير درجة الحرارة على الأنتاج الغذائي. يبلغ معدل التمثيل الضوئي عند درجة الحرارة المثلى (T_{opt}) قيمته القصوى، وعندما تتجاوز درجة الحرارة لهذا الحد يتجه معدل التمثيل الضوئي للصفر. من هنا يمكن التعبير عن العلاقة بين معدل التمثيل الضوئي ودرجة الحرارة وفقا للمعادلة الآتية.

(9.1)

$$k_{Tp} = \begin{cases} 2\left(\frac{T - T_{p0}}{T_{opt} - T_{p0}}\right)^2, if T_{p0} \le T \le \frac{T_{opt} + T_{p0}}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{T - T_{p0}}{T_{opt} - T_{p0}}\right)^2, if \frac{T_{opt} + T_{p0}}{2} < T \ and_{Tp} \ge 0 \\ 0, otherwise \end{cases}$$

حيث:

K_{tp} = تأثير درجة الحرارة على التمثيل الضوئي

T = درجة الحرارة الحقيقية

T_{p0} = درجة الحرارة الأدني للتمثيل الضوئي

T_{opt} = درجة الحرارة المثلى للتمثيل الضوئي

بأخذ هذين العنصرين في الحسبان يمكن حساب صافي الإنتاج الغذائي

يمكن أيضا أخذ درجة الحرارة في الحسبان بالرجوع الى النموذج الرياضي (FINNFOR) الذي قام بصميمه الفلندي كيلوماكي وآخرون (1993) وذلك عند بحوثهم المتعلقة بتأثير التغيرات المناخية على تركيبة النظم البيئية الغابية وعمليات النمو. لقد تم إعتبار تغيرات درجة الحرارة على أساس قياسات كانت تتم كل ساعة وكل يوم وكل شهر وكل سنة. إعتمد حساب متوسط الحرارة اليومي (T_d) على المعادلة الآتية.

$$dT(d) = \mu_{mT} + \rho_{mT} \cdot \left(dT(d-1) - \mu_{mT}\right) + \sigma_{mT} \cdot n_i \cdot \left(1 - \rho_{mT}^2\right)^{1/2} \qquad (10.1)$$

حيث:

T(d) = متوسط درجة الحرارة لليوم
μ_{mT} = متوسط درجة الحرارة للشهر
σ_{mT} = الأنحراف الميارى لمتوسط درجة الحرارة في الشهر
ρ_{mT} = معامل الإرتباط لمتوسط درجة الحرارة في لشهر
n_i = رقم يعبر عن التوزيع الطبيعي للإحتمالات

يمكن حساب درجة الحرارة لساعة معينة ويوم معين بإستخدام النموذج الرياضي (FINNFOR) وذلك بالإستفادة من معادلة جيب الزاوية:

$$T(h) = T(d) + \left(\frac{\sigma_{dT}}{2}\right) \cdot \sin\left((h-6) \cdot 15\right) \qquad (11.1)$$

T(h) = متوسط درجة الحرارة لساعة معينة ويوم معين
σ_{dT} = الإنحراف المعياري لدرجة حرارة اليوم داخل الشهر

يتفق النموذجان الرياضيان المذكوران في إستنباط درجة الحرارة يتخذ من متوسطات درجات الحرارة المعروفة وإنحرافاتها أساساً للحساب. تجدر الإشارة الى أن تاثير درجة الحرارة (على اساس صافي الإنتاج الغذائي) في النموذج الرياضي TREEDYN3 يعتمد على المعرفة المسبقة بإتجاه تأثيرات الحرارة، ولكن يجب في النهاية إتخاذ قيم محددة للمعاملات التي تصلح لكل حالة على حدة.

3.1.1 الماء

يعتبر الماء من العناصر البيئية المهمة جداً لكل الكائنات وذلك لأن الأنشطة الحيوية مرتبطة بالماء سواء بشكل مباشر أو غير مباشر. يمثل الماء جزءاً من عمليات تبادل المواد ويعمل كأصل وأيضاً مكذيب، ويمثل وسيط نقل في عمليات تبادل المواد ويحفظ مادة البلازما في شكلها السائل. يؤثر وجود الماء في عملية المتمثيل الضوئي بشكل غير مباشر عن طريق التأثير على فتحات الثغور (Stomata) وبشكل مباشر عبر تاثيره على العمليات الكيميائية والحيوية عند قيام النبات بعملية التمثيل الضوئي. أورد كرامر (1988) أن الماء كأحد عناصر النمو، يوجد في ثلاثة أشكال رطوبة الهواء والتساقط ورطوبة التربة. لهذا فأن العلاقات المائية في أي موقع لا تنحصر فقط في رطوبة الهواء والتساقط، وإنا تشمل أيضاً التربة وتضاريس الموقع. هذه العناصر الثلاثة يمكن أن تحل أماكن بعضها البعض جزئياً وليس كلياً وفي بعض الأحيان لا يمكن الإحلال إطلاقاً. يمكن للرطوبة العالية في الهواء أن تعوض جزءاً يسيراً فقط من جفاف التربة.

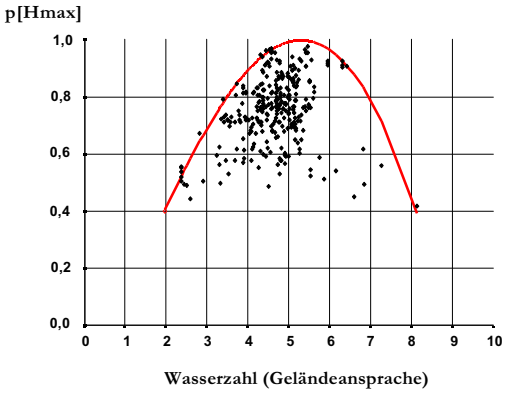
أثبتت البحوث التي أجريت في هذا المجال وجود علاقة قوية بين الإرتفاع الأقصى الذي تصله الاشجار وكمية الماي المتاحة لها. يمكن إستخدام المعادلة (12.1) للتعبير عن هذة العلاقة (الشكل 11.1).

$$p(H\,max) = b_1 \cdot \left[WZ - a\right]^{b_2} \cdot \left[b - WZ\right]^{b_3} \qquad (12.1)$$

حيث:

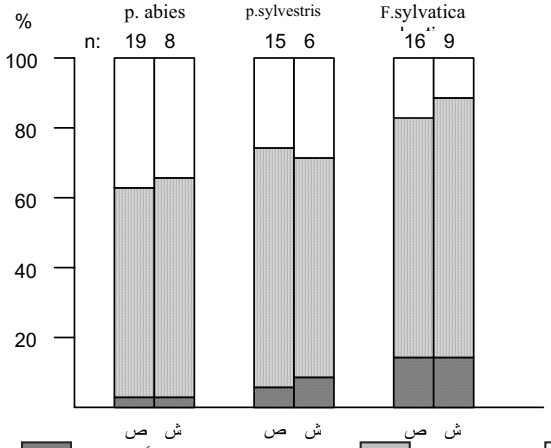
A = أعلى إرتفاع يمكن للشجرة أن تصله في وجود كمية معينة من الماء
P(Hmax) = 0.4 (القيمة الدنيا)
B = 8.90 (القيمة العليا1)
b_1 = 0.03178
b_2 = 1.363
b_3 = 1.0

بلغ أعلى وصلت إليه شجرة صنوبر (*Picea abies*). في التجارب المذكورة أعلاه في موقع بلغت فيه كمية الماء (المؤشر المائي) 5.6 (تعتبر درجة وسط للرطوبة). عند المؤشر المائي 2.0 (موقع شبه جاف) والمؤشر المائي 8.0 (شبه مستنقع مائي) أمكن الحصول على ما يعادل حوالي 40% فقط من هذا الإرتفاع.



الشكل (11.1) متوسطات الإرتفاع في مساحة (Picea abies) تجريبية لعدد من المؤشرات المائية مأخوذة على أساس قيم نسبية من أعلى إرتفاع.

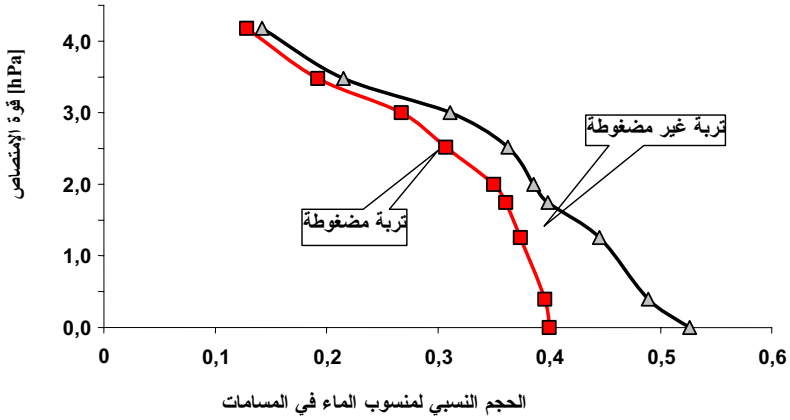
هنالك علاقة قوية تربط بين التمثيل الضوئي والتنفس. تسمح فتحات الثغور بأخذ ثاني أوكسيد الكربون و في نفس الوقت يتكثف الماء في الجو المحيط.
يحدث التمثيل الضوئي الأمثل في وجود تشبع مائي في الأوراق. عند نقصان الماء تضيق فتحات الثغور وهذا يؤدي بدوره إلى تناقص عمليتي النتح والإنتاج الغذائي. تمكن الكثير من تفسير ما يعرف بإستراحة الظهيرة على المنحى اليومي للتصنيع الغذائي مع الإنغلاق الجزئي لفتحات الثغور بسبب ضيق الإمداد المائي. على ضوء إستراحة الظهيرة يمكن الإشارة مرة أخرى إلى قوة العلاقة بين مختلف عناصر النمو.
تتضح إقتصادية الأشجار في إستخدام الماء من خلال إرتفاع الفاقد المائي لكل نوع شجري (الشكل 12.1).



الشكل (12.1): فاقد التساقط، المرور من خلال تيجان الأشجار، الجريان على طول السيقان لثلاثة أنواع شجرية (ص = صيفاً، ش = شتاءاً)

يعتبر المنسوب المائي الأرضي عنصراً مهماً لنمو الاشجار. بإستثناء المياه الجوفية الجارية فإن المصدر الرئيسي للمياه الجوفية هو الأمطار. يمكن التحدث عن التشبع المائي في الحقل عندما تبقى المياه في طبقة أرضية محددة لمدة ثلاثة أيام بعد غمرة تماما بالماء. كلما تشبعت الأرض بالماء، قلت قوة الإمتصاص الموجودة في التربة. مع

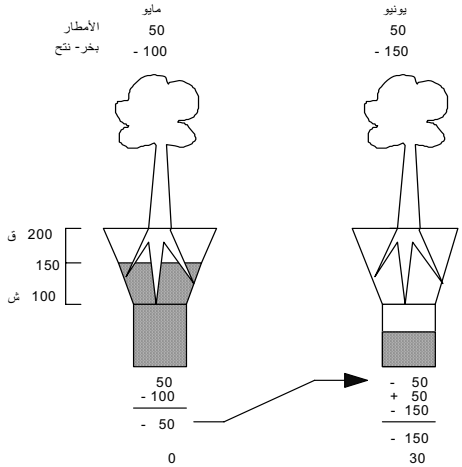
التقدم في إستخدام الماء عبر الجذور، تذيد قوة الإمتصاص إعتماداً على توزيع و حجم المسامات وبالتالي يسوء إستخدام الجذور للمخزون المائي في التربة. عندما يكون الماء مرتبطاً بالتربة للحد الذي لا يسمح الجذور بإستخدامه فأننا نتحدث عن نقطة الذبول ويرمز لها بـــ (pF 4,2). تعتبر قوة الإمتصاص المسيطرة داخل النظام المسامي للتربة قوة مقاومة فيزيائية، وهي قوة ذات تأثير قوي على نمو الجذور. بإزدياد قوة الإمتصاص بعد نقطة الذبول يظهر إنكماش شديد في النمو وعند تجاوز هذه النقطة يصل مستوى الماء المتاح لنمو الجذور الى الحد الحرج. أوضح تيب وآخرون (2000) نقصان الحجم الكلي للمسامات وتغير منحنيات قوة الإمتصاص وذلك بعد تمرير آلية ثقيلة على تربة غابية رملية الشكل (13.1).



الشكل (13.1): منحنيات قوة الإمتصاص في تربة طينية بعمق صفر إلى 5 سم قبل وبعد ضغطها بآلة ثقيلة.

يلاحظ من الشكل (13.1) إختلاف مسار المنحنى في الجزء الأسفل. من الممكن تفسير ذلك بأن ضغط الآلة قد أدى الى تضييق المسافات بين المسامات في التربة مما ادى الى سوء تهوية التربة.

عمل شوقارت على دراسة التغيرات الشهرية في مناسيب المياه دآخل الأرض من الفرق بين كمية الأمطار والتبخر_ النتح (Evapo-transpiration) ، الشكل (14.1) يوضح ذلك.



الشكل (14.1): التغير الشهري في مناسيب المياه الأرضية نتيجة للإضافة في شكل أمطار والسحب عبر البخر_نتح (ح ق ت = الحمولة القصوى للتربة) (ق= الحمولة القصوى للتربة، ش= نقطة التشبع).

يمكن حساب البخر_نتح بعد معرفة البخر الممكن بالملمترات في شهر قياسي. النموزج الرياضي التالي يوضح كيفية الحساب

$$E_{0j} = 16 \cdot (10 \cdot T_j / I)^a \qquad (13.1)$$

حيث:

E_{0j} = البخر_نتح الممكن في شهر محدد بالملمتر

j = شهر قياسي (30يوميا، عدد ساعات كل يوم 12 ساعة)

T_j = متوسط درجة الحرارة الشهرية

I = مؤشر الحرارة، حيث $I = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{T_j}{5} \right)^{1,514}$

a = $(0.675\ I^3 - 77.1\ I^2 + 17.920\ I + 492.390)\ 10^{-6}$

يمكن حساب البخر_نتح الحقيقي عن طريق البخر_نتح الممكن ومن ثم تحديد كمية الماء المتاحة. بعد تجاوز الحمولة الكلية للتربة من الماء، يتطابق البخر_نتح الحقيقي مع البخر_نتح الممكن وفي حالة عدم بلوغ الحمولة الكلية للتربة يعتمد معدل التبخر على القيمة الحقيقية لرطوبة التربة.

$$E = \begin{cases} E_0, & w \geq w_k \\ E_0 \cdot \left(\frac{w}{w_k} \right), & sonst \end{cases} \qquad (14.1)$$

مثال عددي:

E_0 = ملم في اليوم، wk = 180 ملم في اليوم في عمق متر واحد داخل التربة، مادامت w أكبر من wk فإن البخر ونتح الحقيقي E يساوي البخرونتح الممكن E_0 ، أي أنه يساوي 6 ملم في اليوم. إذا إنخفضت رطوبة التربة w الى حد يقل عن wk (صارت 120ملم مثلا) ، فإن قيمة E ستساوي 4 ملم في اليوم.

4.1.1 الهواء

يتكون الهواء من حوالى 78% نيتروجين و21% أوكسجين و1% غاز الأرجون وغازات أرضية أخرى، كما يحتوي أيضا على 0.03 ثاني أكسيد الكربون الذي يلعب دورا أساسيا في عملية التمثيل الضوئي، التي بدورها تمثل نقطة أساسية في تصميم النمازج الرياضية للبحوث المتعلقة بالنمو. تؤدي زيادة ثاني أكسيد الكربون على النسبة المذكورة أعلاه الى زيادة كبيرة في عملية التمثيل الضوئي. أثبتت البحوث أن أدنى إرتفاع في كمية ثاني أكسيد الكربون وحده تؤدي الى زيادة في معدل نمو النباتات بنسبة تتراوح بين 10% و5%.

هنالك إعتقاد بأن محتوى الغلاف الجوي من ثاني أكسيد الكربون كان أعلى مما هو عليه الآن. حاليا يتغير الوضع إذ يمكن إثبات أن المحروقات التي تستخدم لمختلف الأغراض تؤدي من جديد الى زيادة محتوى الهواء من غاز ثاني أكسيد الكربون. من الممكن أيضا إثبات التغيرات الزمنية والمكانية لمحتوى الهواء من ثاني أكسيد الكربون وذلك أثناء ساعات اليوم أو خلال أيام العام دآخل أي مشجر غابي. نتيجة لتنفس الكائنات الحية توجد أعلى درجة لثاني أكسيد الكربون بالقرب من سطح الأرض أثناء ساعات الليل في حين تكون في حدها الأدنى أثناء ساعات النهار. يكون الفرق بين تركيز ثاني أكسيد الكربون ليلا ونهارا في حدوده العليا أثناء الفترة الرئيسية لنمو الأشجار (في المناطق الرطبة) وذلك خلال الفترة من شهر مايو حتى سبتمبر.

تأخذ النباتات ثاني أكسيد الكربون لعملية التمثيل الضوئي أثناء ساعات النهار، وهذا يؤدي الى تقليل كميته في الجو المحيط بالنبات. عند حلول الليل وفي غياب عملية التمثيل الضوئي تزيد كمية ثاني أكسيد الكربون في طبقات الهواء القريبة من الأرض ومن ناحية أخرى نجد ان تركيز ثاني أكسيد الكربون يكون في قمته قبل بدابة الإخضرار وفي حده الأدني قبل حلول الشتاء. على مستوى المشجر: نجد تركيزا عاليا لثاني أكسيد الكربون في منطقة تيجان الأشجار التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي.

قام كيلوماكي بتصميم نموزج رياضي يوضح فيه طريقة لحساب ثاني أكسيد الكربون وقد تم إدراج هذا النموزج دآخل نموزج النمو (FINNFOR) ويعطي قيما للمتوسط السنوي واليومي لثاني أكسيد الكربون يتم حساب المتوسط السنوي لثاني أكسيد الكربون (a) CO_2 في الهواء بالجزء من المليون (المعادلة 15.1)

$$aCO2(a) = iniCO2(a) + \frac{C}{1 + e^{-steep \cdot nyear}} \qquad (15.1)$$

حيث:

CO2(a) = المتوسط السنوي لتركيز ثاني أكسيد الكربون (كأجزاء من المليون) لتلك السنة
iniCO2(a) = تركيز ثاني أكسيد الكربون عند بداية التصنيع الغذائي
Steep = المعمل الذي يحدد درجة ميلان المنحنى
Nyear = عدد السنوات غند بداية عملية التصنيع الغذائي
C = القيمة المطلوبة (المستهدفة) لتركيز ثاني أوكسيد الكربون في نهاية فترة التصنيع الغذائي

يمكن حساب المسار السنوي بتركيز ثاني أكسيد الكربون عن طريق معادلة جيب التمام. يمكن الحصول على قيم ثاني أكسيد الكربون اليومية في الهواء $CO_2(d)$عن طريق المعادلة:

$$dCO2(d) = aCO2(a) + \left(\frac{\sigma_{aCO2}}{2}\right) \cdot \cos\left(0{,}986 \cdot jday \cdot \frac{2\pi}{360}\right) \qquad (16.1)$$

حيث:

CO2(d) = المتوسط اليومي لتركيز ثاني أكسيد الكربون (كأجزاء من المليون لليوم المعين)
CO2(a) = المتوسط السنوي لتركيز ثاني أكسيد الكربون (كأجزاء من المليون للسنة المعينة)
S_{CO2} = الحد الأدنى لتركيز ثاني أكسيد الكربون في فصل الصيف
jday = يوم جوليا (أطول نهار في السنة)

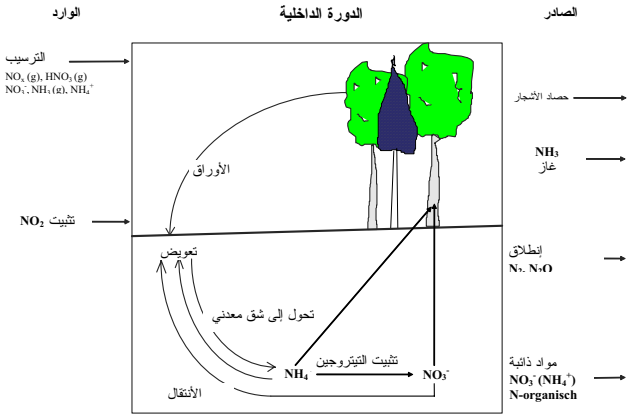
مثال عددي:

يبلغ تركيز ثاني أكسيد الكربون السنوي 330 جزاءا من المليون والفرق بين أعلى تركيز في الشتاء وأدنى تركيز في الصيف يساوء 70 جزاءا من المليون. يمكن حساب تركيز ثاني أكسيد الربون في اليوم رقم 150 منذ بداية السنة كالاتي:

$$\mathrm{CO2(d)} = 330 + \frac{70}{2} \cdot \cos\left(0.986 \cdot 150 \cdot \frac{2\pi}{360}\right) = 300\ \mathrm{ppm.}$$

5.1.1 المحتوي الغذائي

أورد فيدلر وآخرون أن 16 عنصرا من العناصر الكيماوية تؤثر بقوة على النباتات الراقية (Higher plants). يمكن تقسيم هذه العناصر الى عناصر غير معدنية كالكربون والآيدروجين والأوكسجين وعناصر غذائية معدنية. يمكن تقسيم العناصر المعدنية الى عناصر رئيسية (النيتروجين والفسفور والكبريت والبوتاسوم والكالسيوم والماغنسيوم) وعناصر مساعدة (كالحديد والمانجنيز والزنك والنحاس والكلور والبروم)، وتؤثر كل من هذه العناصر على نمو النباتات بطريقة معينة.الشئ الأهم بالنسبة لنمو الشجرة هو وجود النيتروجين بشكل متاح للنبات. يتحصل النبات على النيتروجين إما عن طريق إضافة أسمدة أو عن طريق التثبيت البيولوجيالموجود في الهواء أو عن طريق الإستفادة من نيتروجين الغلاف الجوي (الشكل 15.1). تعمل الأحياء الدقيقة دآخل التربة (التي تقوم بتثبيت النيتروجين) على تحويل النيتروجين الحر الموجود في الجوء الى أمونيا (NH_4^+) التي تدخل في الدورة الغذائية للنباتات.



الشكل (15.1): نموذج قندرسون(1995) لدورة النيتروجين.

إن عنصر النيتروجين موجود في أي منطقة غابات بكميات وفيرة، ولكن الجزء الأكبر منه مرتبط عضويا، وبالتالي فأنه لا يكون متاحا للنباتات. عند تحلل الكائنات التي تموت ينطلق النيتروجين، ويعتبر هذا مصدرا مهما. عند بداية التحلل تتحرر أولا أيونات الأمونيوم (NH_4^+) والتي تحولها البكتريا أو الفطريات المثبتة للنيتروجين الى نترات يمكن للنباتات أخذ النيتروجين في شكل أمونيا أو في شكل نترات.

من خلال هذا النظام ينطلق النيتروجين الى الخارج عبر قطع أو إستغلال الأشجار أو في شكل غازات أو عبر التفكيك (عكس التثبيت) أو عبر إذابته في شكل نترات دآخل المياه الأرضية.

تعتمد سرعة دورة التحلل الطبيعي على الحالة الكيموحيوية للتربة. فهناك تأثير لنوع التربة وتركيبتها وتأثير ذلك على شل وسرعة التحلل والمحتوى النيتروجيني. يتم تحديد أو تعريف مختلف أنواع المواد المتحللة عبر درجة تحللها ومحتواها النيتروجيني وتحسب عن طريق النسبة بين الكربون والنيتروجين التي تعرف بـــ (C/N Ratio) في إطار تصميم نموزج رياضي للعوامل المعقدة لعناصر المواد الغذائية دآخل النموذج الرياضي للنمو فإنه يجب، ليس فقط معرفة كمية المواد الغذائية المتاحة، بل أيضا مدى الحاجة لها وإمكانية الإمداد بمواد جديدة.

هنالك محاولات للبحث عن العلاقة بين النماذج الرياضية لدورتي الكربون والنيتروجين. في النموذج الرياضي Treedyn (الذي ورد ذكره آنفا) وضع سونتاج (1998) ويانتسين ومارتين (1995) إنسياب المواد الأساسية والعمليات المرتبطة بها في الحسبان.

من المصادر المهمة للنيتروجين (NAV) المعادن الناتجة من الحشائش والأوراق الساقطة (NLITR) والمعادن الناتجة من تحلل المواد العضوية (nomnp) والمخزون من المواد العضوية (NSOM) وإرتباط النيتروجين البكتيري (nfix) والنيتروجين المتحرر (nprec). يحدث الفاقد النيتروجيني عبر إنتقاله مع الماء بعد ذوبانه (nleach) الشئ الذي يحدد أخذ النيتروجين بواسطة الشجرة (nup) هو مدى الحاجة له والذي يتحدد هو الآخر عن طريق الظروف الناخية (الإشعاع ودرجة الحرارة) والنمو الممكن عبر الكتلة الورقية للشجرة. تقارن حاجة النبات للنيتروجين مع مخزون النيتروجين في التربة (NAV). يمكن تحقيق نمو جيد إذا أمكن تغطية كل الحاجة من المخزون النيتروجيني الموجود بالتربة، فيما عدا ذلك فإنه يحدث تخلف أو تأخر في النمو.

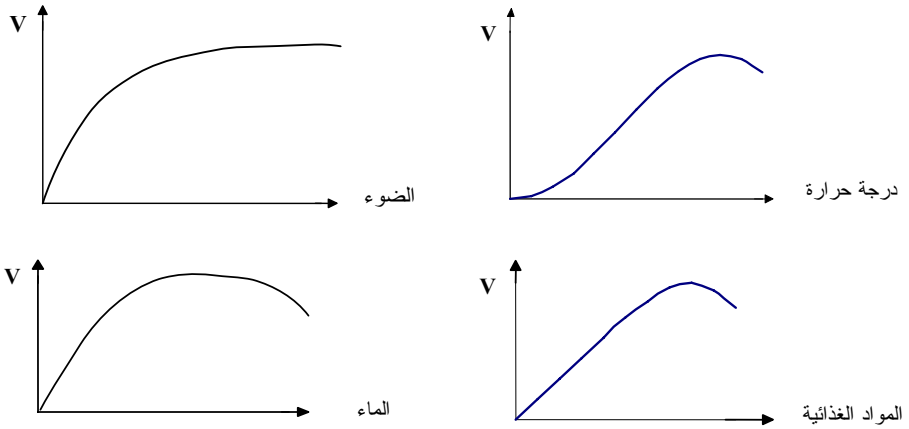
يتم الحصول على معدلات التغيير في المخزون النيتروجيني عن طريق المعادلة الآتية:

$$dNAV / dt = npre + nfix + nlimp + nomnp - nleach - nup \quad (17.1)$$

تلعب التركيبة المعدنية دوراً كبيراً في تحديد خصائص الترب، حيث تؤثر كمية ونوعية السيلكات الأولية الموجودة في الصخور دوراً كبيراً مماثلاً في كمية المواد الغذائي الموجودة في التربة، وذلك عند تحللها عن طريق عوامل التعرية المختلفة. بهذا الفهم يمكن النظر للتربة على أنها بؤرة (او منطقة تفاعلات) تعطي المواد وتؤخذ من خلالها. من المهم ايضاً محتوى التربة من المواد عند تحليلها (الأيونات الحرة) وإعادتها الي مجمع التحلل.

2.1. تصميم النموذج الرياضي للظروف المحيطة بالموقع

إهتمت البحوث الخاصة بنمو الأشجار منذ أمد بعيد بفهم التأثيرات لمختلف عناصر الموقع على نمو المشجر الغابي والإستفادة من الخبرات التي تم الحصول عليها بهذا الشأن. تلعب بعض العناصر دوراً كبيراً، خصوصاً إذا كان لها تأثير تحكمي على النمو ففي المواقع الجافة نجد أن العامل المحدد (limiting factor) للنمو هو الرطوبة وفي المواقع شديدة الرطوبة نجد أن العامل المحدد أي(الأكبر أثراً) هو تهوية التربة والتي تذيد أهميتها مع زيادة المواد الغذائية في الموقع. في المواقع ذات الإمداد المائي الجيد والغنية بالمواد الغذائية فإن الموضع الذي توجد فيه المواد الغذائية و الضوء هما العنصران المحددان. هنالك إختلاف واضح بين العلاقات بين العناصر المحددة للنمو وتراكم الكتلة الحية (الشكل 16.1).

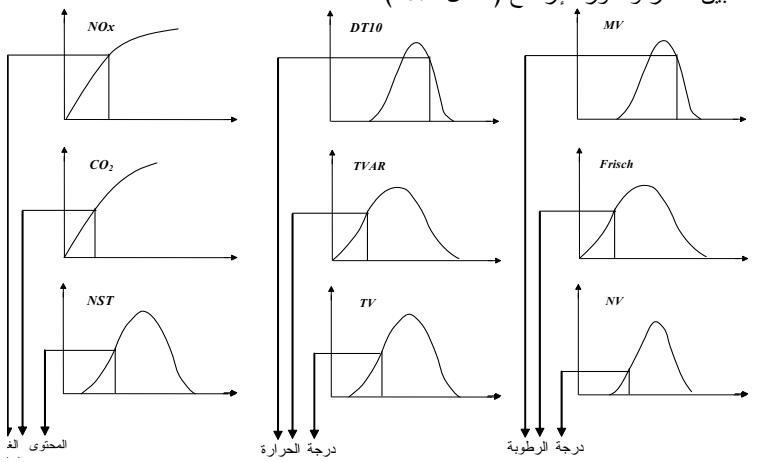


الشكل (16.1): العلاقات بين بعض عناصر الموقع المحددة للنمو وتراكم الكتلة الحية (ك)

من الملاحظ أن منحنى الضو هو الوحيد الذي يصل الى نقطة معينة ثم يستمر دون نغيير، أما درجة الحرارة وكمية المواد الغذائية فهي علاقات قيم قصوي. هنالك العديد من الأمثلة لتحويل العلاقات الموجودة على الشكل (16.1) الى قيم عديدة. من هذه الأمثلة معادلات الإنحدار المركب (Multiple regression). هنالك عدد من البرامج الحاسوبية التي تم تصميمها للقيام بمثل هذه الأعمال. من المشاكل الأساسية التي تواجه تصميم النماذج الرياضية لنمو الغابات أن بعض القيم التي يتم الحصول عليها عن طريق تخريط الموقع الغابي غير محددة ووصفية أكثر منها رقمية. فمثلا قد نجد موقعا تم وصفه على أنه (مستوي الى متوسط الإنحدار) أو (متوسط درجة الرطوبة) أو أن (الإمداد الغذائي متوسط). يجب إيجاد طريقة من خلالها إدخال مثل هذه المتغيرات الخاصة بالموقع كل في النموذج الرياضي الخاص به وذلك نظرا للتفاوت في تعريف مثل هذه المتغيرات. أورد كان (1994) مثالا لتحويل مثل هذه المعلومات لتناسب النماذج الرياضية. تم تعريف ثلاثة عناصر بيئية معقدة هي محتوى المواد الغذائية ودرجة الحرارة ودرجة الرطوبة للمساعدة في تصنيف الموقع الغابي إعتمادا على المنهج الغابي الخاص بتخريط الموقع. تم تلخيص هذه العناصر في الآتي:

(Nox) = درجة تركيز أكسيد النيتروجين (عنصر مؤثر)، (CO2) = ثاني أكسيد الكربون (عنصر مؤثر)، (NST) = الإمداد بالمواد الغذائية (يتم الحصول عليه من التخريط الغابي)، (DT10) = عدد أيام السنة التي يكون فيها متوسط درجة الحرارة أكثر من 10 درجات مئوية، (TVAR) = مقدار درجة الحرارة السنوية، (TV)

= متوسط درجة الحرارة في السنة، (MV) = مؤشر الجفاف، (Frisch) = درجة رطوبة التربة (يتم الحصول عليها من التخريط الغابي)، (NV) = كمية الأمطار أو التساقط (بالملميتر).
هذه العناصر التسعة، والمعروفة بالعوامل البيئية المعقدة، تمت مراعاتها في إطار تصميم النموذج الرياضي الذي يصف العلاقة بين العمر وتطور الإرتفاع (الشكل 17.1).



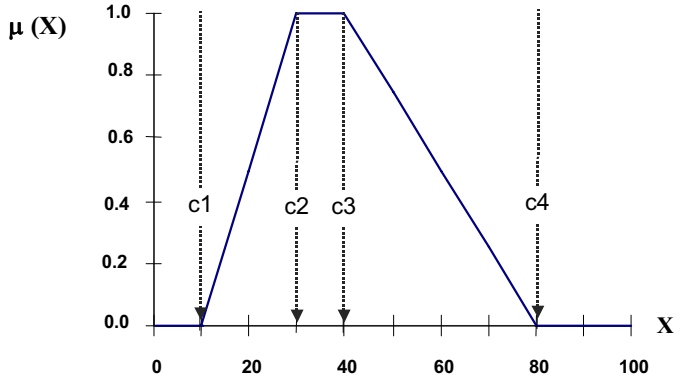
الشكل (17.1) إستنباط العناصر البيئية المعقدة (الغذاء والحرارة والرطوبة) عن طريق دوال تأثيرات محددة (لفهم الرموز راجع القائمة أعلى هذا الجدول).

يمكن تحويل الأوصاف المتدرجة لعناصر الموقع الخاصة بالإمداد الغذائي ورطوبة التربة الى تدرج على المقياس المتري وذلك باستعمال ما يعرف بقاعدة المتغيرات اللغوية. يمكن ايضا تحويل الاوصاف التصنيفية التي تم الحصول عليها من تخريط الموقع الى قيم عددية (تقريبية)على المنهج الذي وضعه جن هوانج (1992) (الجدول 1.1).

المتغير	**رطوبة التربة**		**الإمداد الغذائي**	
التدرج	7		4	
المصطلح	**المصطلح المتخصص**	**"القيمة"**	**المصطلح المتخصص**	**"القيمة"**
لاشئ				
قليل جداً	sehr trocken	0.083		
قليل–قليل جداً	trocken	0,.25		
قليل	mäßig trocken	0.250	gering	0.115
شبه قليل				
قليل– وسط	mäßig frisch	0.370	gering-mittel	0.300
أقرب للوسط				
وسط	frisch	0.500	mittel	0.500
أكثر من الوسط				
وسط– عالي	sehr frisch	0.630	mittel-hoch	0.700
شبع عالي				
عالي	feucht	0.750	hoch	0.885
عالي– عالي جداً	naß	0.875		
عالي جداً	sehr naß	0.917		
ممتاز				

جدول (1.1): تحويل الأوصاف التصنيفية الى قيم عددية (تقريبية)

يمكن وصف عناصر البيئة التسعة وتاثيها على نمو الإرتفاع عن طريق دالة التأثير $\mu(x)$ ، حيث X هو مدى تأثير أي عنصر مرتبط بالموقع و $\mu(x)$ هو التأثير على نمو الإرتفاع.
الشكل (18.1) يوضح تأثير أحد العناصر التسعة على النمو (تجدر الملاحظة الى أنه يتبع نمطٌ واحدا).



الشكل (18.1) يوضح تأثير أحد العناصر التسعة على النمو

بإستخدام دالة توضح أثر واحد من العناصر فإن الزيادة تمضي على وتيرة واحدة حتى تصل قيمتها القصوى (أعلى قيمة لها). بعد بلوغ هذه القيمة فإنها تسقط أيضا بوتيرة واحدة. يمكن التعبير عن الشكل (18.1) رياضيا بالمعادلة الآتية:

$$\mu(x) = \begin{cases} \dfrac{x - c1}{c2 - c1}, & c1 \le x \le c2 \\ 1, & c2 \le x \le c3 \\ \dfrac{c4 - x}{c4 - c3}, & c3 \le x \le c4 \\ 0, & sonst. \end{cases} \qquad (18.1)$$

حيث:

$\mu(x)$ = تأثير العنصر X على نمو الإرتفاع
X = تصاعد (تحسن) اي من عناصر الموقع
C1 حتى C4 = ثوابت المعادلة

كمدخل لإستعمال هذه المعادلة يتحتم الحصول على العنصر المطلوب X وثوابت المعادلة (C1 حتى C4) ثم إدخال معلومات الموقع الموجودة في الجزء الخاص بإدخال المعلومات (data intry). بعد تحديد القيم يتم إدخالها في البرنامج الرئيسي. تقع القيم (بعد إجراء عملية تحويل إلى نسب) بعد العددين (0 و 1). الجدول (2.1) يوضح القيم التي تم حسابها في موقع مشجر صنوبر.

المتغير	X (قيمة العنصر)	μ(X) (القيمة المحولة)
Frisch	0.7	0.62
NST	0.115	0.29
TV	12.5	0.85
TA	8.0	1.00
NV	330	0.63
MV	14.67	0.90
MA	41.67	0.90
TVAR	14.35	0.54
DT10	141.01	0.94

الجدول (2.1): مثال لقيم عناصر الموقع المختلفة بعد إجراء عملية التحويل.

تم أخذ العناصر البيئية الثلاثة المعقدة مجتمعة في برنامج حاسوبي يعرف ب (Oekoparm).
لتصميم نموذج رياضي لتطور الإرتفاع مع العمر إعتمد البرنامج على معادلة رتشارد حيث أخذ كان (1994) الأس (القوة) 3 في المعادلة كقيمة ثابتة في كل الأحوال.

$$H_O = \alpha_0 \cdot \left[1 - e^{-\alpha_1 \cdot t}\right]^3 \qquad (19.1)$$

بأخذ معلومات من عدة مرابيع عينة يتم تحليل الإنحدار (Regression Analysis) للقيم الناتجة من معادلة النمو التي يتم إستخدامها. في عملية تحليل الإنحدار تثبت كل قيمة حين تبلغ قيمتها القصوى. يعتبر العمر (A) و الإرتفاع (H) دالتان للموقع. كما ذكر آلفا فإن توسيع دائرة التنبؤ بالنمو المستقبلي عن طريق أخذ كل المعلومات الخاصة بالموقع الغابي المحدد يعتبر أمراً مهماً ومطلوباً.

2. تصنيف جودة المواقع الغابية

كما ذكر عند الحديث عن الموقع، فإن المواقع المختلفة تتفاوت في كمية الإنتاج الهدف من تصنيف خصائص المواقع هو تحديد القدرة الإنتاجية لارض المشجر: سواء كان يحتوي على أشجار أم لا، إذن فإن درجة الموقع (Site quality) هي المقياس لانتاجيته والتي تقدر بكتلة الأخشاب التي يتم الحصول عليها في وحدة مساحة محددة ووقت محدد (كرامر وأكشا، 1995). معيار القياس المستخدم لهذا الغرض في العادة هو الكمية الكلية لانتاجية الموقع (GWL_t) في عمر مرجعي محدد (t).

لتحديد درجة جودة الموقع يمكن إستعمال طرق مباشرة واخرى غير مباشرة. في الطرق المباشرة يجب أن تعطى مواصفات محددة عن الإنتاج الحقيقي والممكن للمشجر. أما الطرق غير المباشرة لقياس درجة جودة الموقع فإنها لا تعدو ان تكون محاولة لقياس العوامل التي تؤثر في الإنتاج مثل المناخ والغطاء النباتي وعناصر التربة.

1.2 المشجر كمعيار لقياس درجة جودة الموقع

في الطرق المباشرة لتصنيف درجة جودة الموقع يجب الإشارة الى التصنيف النسبي والتصنيف المطلق بإستعمال الإرتفاع أو متوسط الزيادة السنوية الكلية للحجم. يمكن إستعمال هذه الطرق في الغابات التي تدار على أساس القطع الكلي، أي ان الغابة ذات عمر واحد وبالتالي يمكن ترتيب الأعمار بحيث تزيد الإنتاجية مع زيادة العمر منذ بداية إنشاء الغابة حتى حصادها عن طريق القطع الكلي للأشجار، أما الغابات التي تدار على اساس القطع الإنتقائي تتطلب طريقة اخرى.

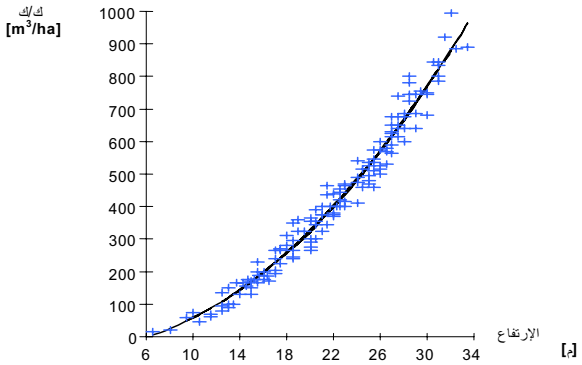
تصنيف درجة جودة الموقع في غابات القطع الكلي

يتم حساب الكمية الكلية للإنتاج (GWL_t) في العمر (t) وذلك عن طريق جمع الناتج من كل عمليات التخفيف (الشلخ) التي تمت داخل المشجر منذ إنشائه وحجم المخزون الخشبي الموجود بالمشجر عند نهاية الدورة الغابية، في العمر (t) والمعادلة (2.1) توضح ذلك.

$$GWL_t = V_t + \sum_{i=1}^{t} Df_i \qquad \left[m^3/ha\right] \tag{2.1}$$

الشرط الأساسي لحساب الكمية الكلية للإنتاج (GWL_t)، إذن هو إمكانية الحصول على المعلومات المطلوبة عن حجم المخزون الخشبي النهائي في العمر(t) وناتج عمليات التخفيف على مدى عمر المشجر، وهي معلومات لا تكون متاحة في العادة ولذلك يجب حساب الكمية الكلية للإنتاج بإستخدام معلومات بديلة.

في أبحاث اجراها رجل الغابات الألماني المعروف آيشهورن في عام (1994) في الغابة السوداء بألمانيا وجد أن هنالك علاقة بين الكمية الكلية للإنتاج في الغابة (GWL_t) ومتوسط الإرتفاع. من هذه العلاقة تطور في وقت لاحق ما يعرف الآن بقانون آيشهورن (Eichhorn law) الذي يتحدث عن ان الكمية الكلية للإنتاج الخشبي في الغابة عبارة عن دالة في الإرتفاع. تأكيدا لذلك يعرض الشكل (1.2) الكمية الكلية للإنتاج الخشبي والإرتفاع المقابل لها لمواقع غابية مختلفة وهي عبارة عن علاقة تصاعدية بسيطة (Simple Exponential function).

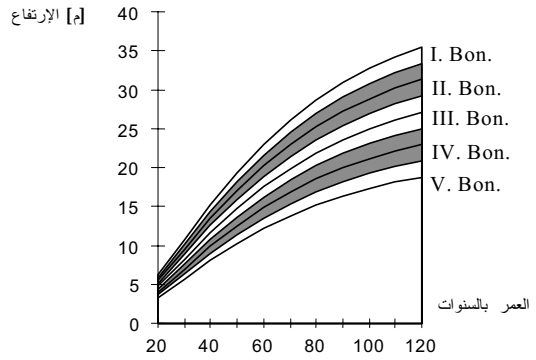


الشكل (1.2): العلاقة بين الكمية الكلية للإنتاج وإرتفاع المشجر في مرابيع عينة بمنطقة الألب بألمانيا (أخذت من مرسماير، 1997) (ك ك! = الكمية الكلية للإنتاج).

لعب قانون أيشهورن دوراً اساساً في تطور جداول الانتاج (Yield Tables) التي تسمح بمعرفة المخزون الخشبي والزيادة التي تحدث في المشاجر في مختلف أعمارها. إذن، بمعرفة العلاقة بين عمر المشجر وإرتفاعه وبمعرفة العلاقة بين الإرتفاع والكمية الكلية للإنتاج فإنه يمكن معرفة الكمية الكلية للإنتاج. بهذا فإن المعلومات الأساسية لتصميم جدول الإنتاج تكون قد إكتملت. تسمح المعرفة (الحقيقية) لمتوسط إرتفاع المشجر بتحديد الكمية الكلية للإنتاج. هذا يعني مرة أخرى أن تصميم النموذج الرياضي لنمو الإرتفاع (Height growth model) يسمح بتحديد التطور الذي يحدث في الكمية الكلية للإنتاج في مختلف الأعمار. بناءاً على محورية دور الإرتفاع في تحديد الكمية الكلية للإنتاج فإن تصميم النموذج الرياضي لتطور الإرتفاع ذو أهمية بالغة، وذلك لان المقاييس المستخدمة لقياس درجة جودة المواقع تقوم على النماذج الرياضية للإرتفاع، وهي الأكثر إستعملاً في مجالات علوم الغابات. ينقسم تصنيف درجة جودة المواقع الغابية الى تصنيف نسبي وتصنيف مطلق بناءاً على المنهجية التي يتم بها التصنيف.

التصنيف النسبي (عن طريق الإرتفاع):

بالنظر للعلاقة بين متوسطات الإرتفاع مع الإعمار المقابلة يمكن الحصول على منحى نمو وعند رسم كل المنحنيات لنوع شجري معين(بيانياً) في منطقة غابية محددة يتكون حزام يشبه القرن. يمثل الحد الأعلى لهذا الحزام المشاجر ذات النمو الأخضر (فيما يتعلق بالإرتفاع)، أما الحد الأدنى للحزام فهو يمثل المشاجر ذات النمو الأقل أو الأضعف. ينتج عن تقسيم المساحة المحصورة بين المنحنيين الأعلى والأدنى مجموعة أحزمة تمثل درجات متفاوتة لنمو الإرتفاع مع تطور العمر. من هذه الأحزمة يمكن إستنباط درجات جودة الموقع (الشكل 2.2 صممة متشلرلش 1970).



الشكل (2.2): تصنيف درجات جودة الموقع (بناءاً على نمو الإرتفاع) لجدول إنتاج نوع من الصنوبر (Picea apies) (تخفيف وسط، أخذ من فيدامان، 1936) (د= درجة جودة الموقع).

لتسهيل قراءة الشكل تم تظليل درجات الجودة III و IV. بناءاً على هذا الشكل يمكن القول أن المشجر الذي يبلغ من العمر 100 عام ومتوسط إرتفاعه 25 متراً يمثل درجة موقع III.

في تطور لاحق تم إستبدال مصطلح درجة جودة الموقع (Site quality class) بمصطلح صف الإنتاج. إن صف الإنتاج لا يوضح في حقيقة الأمر شيئاً عن إنتاجية المشجر ويكون الحديث عن التصنيف النسبي، لأن الترتيب على أساس صفوف إنتاج I و III أو V و إنما يعني ما إذا كان يجب تصنيف المشجر (من حيث نمو الإرتفاع) الى صف الإنتاج الأفضل (I) أم المتوسط (II) أم الأضعف (V).

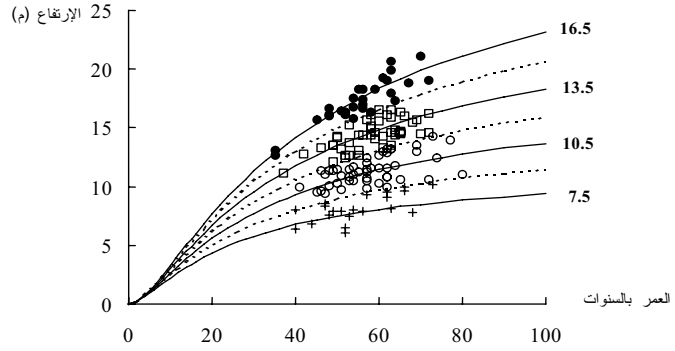
كما هو واضح من هذه الطريقة فإنه لا يمكن معرفة فروقات أو إختلافات مطلقة فيما يتعلق بالإنتاجية. لهذا السبب فإن الزيادة في الكمية الكلية للإنتاج في مختلف جداول الإنتاج متباينة جداً على الرغم من أن درجات الجودة المستخدمة متشابه. إنه ليس من المعروف (عادةً) ما إذا كانت الإختلافات في أطر الجودة لمختلف جداول الإنتاج تعبير حقيقي عن خصائص المنطقة التي تنمو فيها الأشجار أم أنها إجتهاد شخصي من مصممي الجداول أملته الطريقة التي أستخدمت في التصميم. في المرحلة الحالية من تطور علوم الغابات نجد أن درجات تصنيف جودة الموقع الخمسة (المتفق عليها تقريباً) غير كافية، في كثير من الإحيان، لتغطية كل المنطقة لهذا السبب يتم اللجوء الى إضافة صف الإنتاج (صفر). يعزى هذا النقص (جزئياً) الى الطريقة الإجتهادية التي تستعمل لتحديد الأحزمة الخاصة بدرجات جودة الموقع.

التصنيف المطلق (عن طريق الإرتفاع):

على تقيض من صفوف الإنتاج فإنه يمكن عبر التصنيف المطلق إعطاء معلومات نوعية دقيقة عن الإنتاجية الحقيقية للمشجر في العمر المعين التصنيف المطلق (عن طريق الإرتفاع) يحدد الإرتفاع الذي يصل إليه المشجر في عمر معين (يعرف بالعمر المرجعي لتصنيف جودة الموقع: Base age for site quality Classification). من مميزات هذا النوع من التصنيف إنه يسمح بالمقارنة بين مختلف درجات جودة الموقع. من أشهر الإستخدامات لهذه الطريقة هذ جداول النوع الشجري (Picea apies) في منطقة بافاريا بألمانيا والتي قام بصميمها آسمان وفرانس في العام 1963 وجداول الإنتاج التي صممها ليمبكة في العام 1977 للنوع الشجري (*Pinus sylvestris*) وجداول الإنتاج لمشاجر الدوقلاس في شمال ألمانيا التي صممها بيرجل في العام 1985 وجداول الإنتاج لغابات الصنط بمنطقة النيل الإزرق بالسودان من تصميم الطيب في العام 1985.

الشكل (3.2) يوضح مثالا لدرجات تصنيف جودة الموقع لمشاجر النوع الشجر(*Pinus densiflora*)بجمهورية كوريا (العمر المرجعي للتصنيف 50 سنة).

لتصنيف خصائص الموقع لانواع شجرية مختلفة في مشاجر مختلفة أو للتنبو بإنتاجية مشجر قيد الإنشاء بنوع شجري معين يمكن إستخدام ما يعرف بجداول ترتيب جودة المواقع.



الشكل (2.3): التسنيف المطلق (عن طريق الإرتفاع) لمشاجر النوع الشجري Pinus densiflora بكوريا (مأخوذة من شونق، 1996).

الجدول (1.2) يوضح ترتيب جودة الموقع المطلقة لاربعة أنواع شجرية. العمر المرجعي للتصنيف يساوي 50 سنة.

مثال: في موقع معين وجد ان جودة الموقع بالنسبة للنوع الشجري (Picea apie) تساوي 15 متراً بالنسبة للصنوبر من نوع(*Pinus sylvestris*) و13 متراً للنوع (*Fagus sylvatica*) و16 متراً *للنوع (Fraxinus excelsior).*

Picea	*Kiefer*	*Buche*	*Esche*
10	11	10	16
11	12	10	16
11	12	10	16
12	13	11	16
13	14	12	16
13	14	12	16
14	15	13	16
15	16	13	17
15	16	13	18
16	17	14	19
17	18	15	20
17	18	15	21
18	19	16	22
18	19	16	23

الجدول (1.2): ترتيب جودة الموقع حسب ما أورده كيلر (1978) و ليم (1991). العمر المرجعي = 50 سنة.

يمثل تصميم النماذج الرياضية لتطور الإرتفاع الأساس لاستنباط درجات جودة الموقع، حيث يأخذ منحنى العلاقة بين العمر والإرتفاع الشكل (S) في الحروف اللاتينية. من المناسب وصف مثل هذا الشكل (تطور الإرتفاع مع تقدم العمر) بواسطة نموذج رياضي ثلاثي العوامل وذو قمة وآحدة لا يحدث تغيير بعدها مهما تقدم العمر (Asymtotic). من النماذج الرياضية المشهورة لوصف نمو الإرتفاع نذكر معادلة شابمان– ريتشارد والتي تقرأ كالاتي:

$$H_O = \alpha_0 \cdot \left[1 - e^{-\alpha_1 \cdot t}\right]^{\alpha_2} \qquad (2.2)$$

حيث:

H_O =إرتفاع السائد في المشجر (بالأمتار)

t = عمر المشجر (بالسنوات)

α_0 .. α = ثوابت النموذج الرياضي (يتم الحصول عليها تجريبيا)

تمثل α_0 القيمة القصوى للإرتفاع (Asymtotic Height value). هنا يتعلق الأمر بعنصر قياس يحتوي على وحدات قياس مماثلة لوحدات المتغير المرتبط (H_0). الثابت (α_1) يقسم المحور الزمني (المحور السيني في هذه الحالة)، في حين ان الثابتين α_1 و α_2 معاً يحددان شكل منحنى لنمو، أي إتجاه المنحنى بناءاً على مكان وجود المحور الزمني (السيني).

يتم حساب التصنيف المطلق للموقع (بناءاً على الأرتفاع) عن طريق التعويض للإرتفاع في المعادلة أعلاه. للتصنيف المطلق للموقع في عمر 100 سنة يحصل الإنسان على ما يعرف بمنحني الإستدلال (Guide curve).

$$SI_{100} = \alpha_0 \cdot \left[1 - e^{-\alpha_1 \cdot 100}\right]^{\alpha_2} \qquad (3.2)$$

في الممارسة العملية يستخدم الإرتفاع والعمر كمدخل لصنيف درجة جوة الموقع. للحصول على لتصنيف المطلق لجودة الموقع عن طريق العمر و الإرتفاع يجب إجراء عملية تحويل جبري للمعادلة (3.2). بحل المعادلة (2.2) بجعل α موضوعاً للقانون و التعويض في المعادلة (3.2) يمكن الحصول على معادلة تصنيف جودة الموقع المعادلة (4.2).

$$SI_{100} = H_O \cdot \left[\frac{1 - e^{-\alpha_1 \cdot 100}}{1 - e^{-\alpha_1 \cdot t}}\right]^{\alpha_2} \qquad (4.2)$$

وبعكس هذه الطريقة يمكن تحويل المعادلة (4.2) و ذلك في جوة تصنيف الموقع المطلق على أساس الإرتفاع. إلى معادلة تعبر عن تطور الإرتفاع السائد مع العمر و بالتالي يمكن تصميم نظام كامل لتصنيف خصائص الموقع (مجموعة منحنيات). يمكن حل كل هذه المسائل عن طريق البرنامج الحاسوبي (Hoehe) حيث (H2) يمثل (SI_{100}) و ايضاً الإرتفاع السائد (H_0).

تمارين

1. إستعمل النمذج الرياضي $H= 35\ (1\text{-}e^{-0.02.t})^2$ لنوع شجري معين بأحد المشاجر. إذا كان العمر المرجعي للتصنيف = 100 سنة، أحسب المؤشر المطلق لجودة الموقع.
2. من المسألة الأولى أعلاه أنشئ نموذج رياضي لتصنيف درجات الجودة لهذا الموقع.
3. أحسب بدلالة لمعادلة أعلاه المؤشر المطلق للموقع لمشجر غابي من ذات النوع الشجري المذكور أعلاه. يبلغ عمر المشجر 40 سنة ومتوسط الإرتفاع 12 متراً.
4. أحسب متوسط الإرتفاع المتوقع في عمر 60 سنة لمشجر من النوع الشجري المذكور أعلاه يساوي المؤشر المطلق لموقعه 30 متراً.
5. أحسب متوسط الإرتفاع لمشجر عمره الآن 120 سنة ومتوسط إرتفاع يبلغ 32 متراً في عمر 50 سنة.

يمكن الحصول الحصول على ثوابت معادلة شابمان– ريتشارد عن طريق تحليل الإنحدار غير الخطي البسيط (Simple non- linear regression) وذلك إما عن طريق معلومات يتم جمعها من الحقل عن الإعمار والإرتفاعات المقابلة لها أو عن طريق المعلومات الموجودة في جداول الإنتاج المنشودة. توجد عدة طرق أخرى تستعمل فيها معادلات نمو. هنالك عدد من الباحثين يستخدمون معادلة شوماخر والتي تعتبر أبسط بكثير من سابقتها ويمكن عن طريقها تحديد الثوابت عن طريق تحليل الإنحدار الخطي البسيط (معادلة 5.2).

$$H_O = \alpha_0 \cdot e^{-a_1 \frac{1}{t}} \qquad (5.2)$$

إستعمل ساوليرو و آخرون (1994) نموذجاً رياضياً إستخدموا فيه منحنى الإستدلال (guide curve) لتحديد الإرتفاع السائد في مشاجر (*Pinus pinaster*)، وقد إستخدموا في هذا النموذج الرياضي نقطة قمة الإرتفاع السائد دالة للتصنيف المطلق لجودة الموقع (المعادلة 6.2)

$$H_O = 2.5385 \cdot SI^{0.9656} \left(1 - \frac{1}{e^{0.0419 \cdot t}}\right)^{1.3762} \qquad (6.2)$$

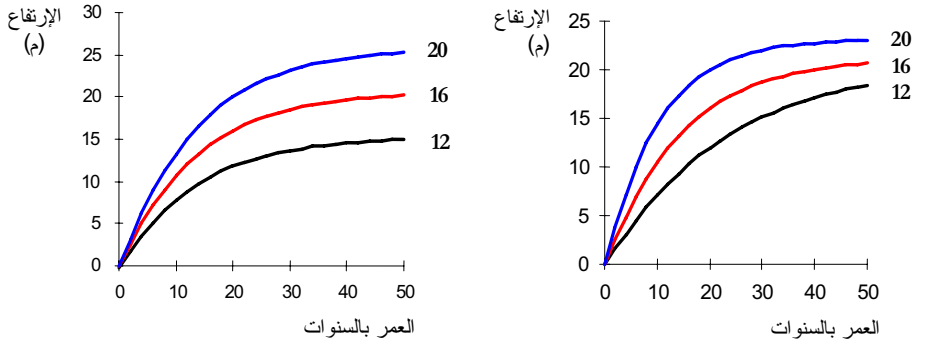
حيث:

H_0 = الإرتفاع السائد للمشجر (بالديسيمترات).

t = عمر المشجر (بالسنوات)

SI = الإرتفاع السائد للمشجر عند 20 سنة (بالديسيمترات)

يعتمد تصميم النماذج الرياضية على قيم محددة للثوابت، لهذا فإن العلاقة بين الإرتفاعات في مختلف درجات الجودة مع زيادة العمر تظل ثابتة، بحيث أن شكل منحنى الإرتفاع لا يعتمد على درجة جودة الموقع. هذا النوع من نظم قياس جودة الموقع يعرف بالنظام الأحادي(Anamorphic) (الشكل (4.2) الى اليسار). ينتج النظام المتعدد (Polymorphic) عندما يتحدد شكل المنحنى عن طريق درجة جودة الموقع. في مثل هذه الحالة فإن الثوابت التي تحدد شكل المنحنى تكون معتمدة على درجة جودة الموقع. لا يمكن أن يتم تأكيد شكل وتأثيرات مثل هذه العلاقات إلا عن طريق الحصول على معلومات من مرابيع عينة دائمة تقاس دورياً ولفترة زمنية طويلة.



الشكل (4.2): الشكل الأحادي (الى اليسار) والمتعدد (الى اليمين) لنفس درجة الموقع المطلقة (العمر المرجعي للتصنيف= 20 سنة).

عمل يانسن وآخرون على تطوير نظام متعدد لتحديد درجة جودة الموقع. تقرأ المعادلة التي إستخدموها في ذلك كالاتي:

$$H_2 = H_1 \cdot \left[\frac{1 - e^{-\alpha_1 \cdot t_2}}{1 - e^{-\alpha_1 \cdot t_1}}\right]^{\alpha_2} \qquad (7.2)$$

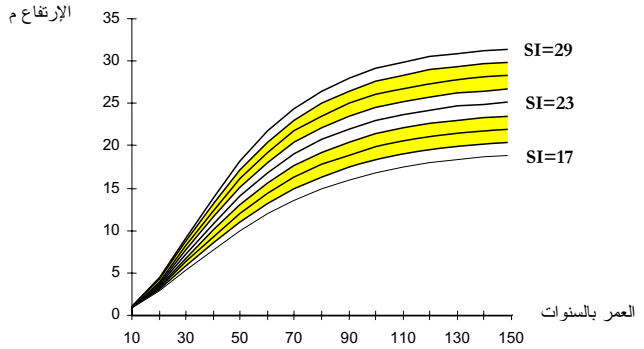
حيث:

H_1, H_2 = الإرتفاع السائد في العمر الأول والعمر الثاني

α_1 = 0.008323 + 0.0003241* SI ،حيث SI = الإرتفاع السائد في العمر 100

α_2 = 1.333

مثال آخر للأشكال المتعددة لمنحنيات درجة جودة الموقع هو النظام الذي قدمه روجو ومنتير لمشاجر (Pinus sylvestris) في أسبانيا، حيث قاما في البداية بتحديد ثوابت معادلةريتشارد- شابمان لافضل وأسوأ المواقع. لتحديد القيم للمواقع الوسطية تم حساب قيم الأعمار والإرتفاعات عن طريق ملء الفراغات بين المنحنيات الأفضل والأسوأ وذلك بإستعمال ما يعرف ب (Interpolation) الشكل (5.2).



الشكل (5.2): تصنيف درجات الموقع المتعدد للنوع (Pinus sylvestris) في أسبانيا، مأخوذة من روجو ومونتيرو (1996) (العمر المرجعي= 100 سنة، (SI) = الإرتفاع ومؤشر الموقع بالأمتار).

الجدول (2.2) يوضح عدة أمثلة لنماذج رياضية للإرتفاع إستعملت للنوع (*Pinus radiata*) في مشاجر شمال غرب أسبانيا.

نظام أحادي	$H = 2{,}159046142 * I.S.^{0{,}910933349} * \left(1 - \exp^{-0{,}066405978 * edad}\right)^{1{,}624531182}$
نظام متعدد	$H = 4{,}730223230 * I.S.^{0{,}644758557} * \left(1 - \exp^{-0{,}069741624 * edad}\right)^{\left(8{,}693353842 * I.S.^{-0{,}543225510}\right)}$
نظام متعدد (معدل)	$H = 2{,}897111962 * I.S.^{0{,}489919950} * \left(1 - k^{\frac{edad}{20}}\right)^{\left(7{,}589013609 * I.S.^{-0{,}178144732}\right)}$ $k = 1 - \left(\frac{I.S.}{2{,}897111962 * I.S.^{0{,}489919950}}\right)^{\left(7{,}589013609 * I.S.^{-0{,}178144732}\right)}$
نظام ويبل الأحادي	$H = 2{,}01553786 * I.S.^{0{,}91274421} * \left(1 - \exp^{-\left(\frac{edad}{19{,}40699564}\right)^{1{,}39768947}}\right)$
نظام ويبل المتعدد	$H = 2{,}03592409 * I.S.^{0{,}907885651} * \left(1 - \exp^{-\left(\frac{edad}{19{,}36949783}\right)^{\left[6{,}38807820 * I.S.^{-0{,}50085130}\right]}}\right)$

الجدول (2.2): نماذج رياضية للإرتفاع أحادية ومتعددة الأشكال لمشجر من النوع (Pinus radiata) في شمال غرب أسبانيان (SI) مؤشر الموقع (أخذ الشكل من ألفارز قونزالز، 198).

كما ذكر آنفا ، فإن ثوابت النموذج الرياضي يتم على أساس معلومات من خلال قياسات حقلية تعتمد فيها دقة نتائج النماذج الرياضية على درجة جودة المعلومات التي تتوفر لهذا الغرض. تجمع في كثير من الأحيان معلومات عن أعمار وإرتفاعات مشاجر تؤدي في جملتها الى تكوين صفوف زمنية غير حقيقية (نظراً للقياس في مختلف الأعمار في نفس الزمن)، فهي لا تعطي التطور الحقيقي للمشاجر كل على حدة ولكنها تستعمل في بعض الأحيان عند عدم توفر معلومات أفضل. يجب في مثل هذه الحالة تحديد نمو الإرتفاع لاشجار مختارة عن طريق تحليل الساق (Stem analysis). من المؤسف أن يكون تاريخ تطور الأشجار التي يتم تحليلها مجهولاً (في العادة)– من

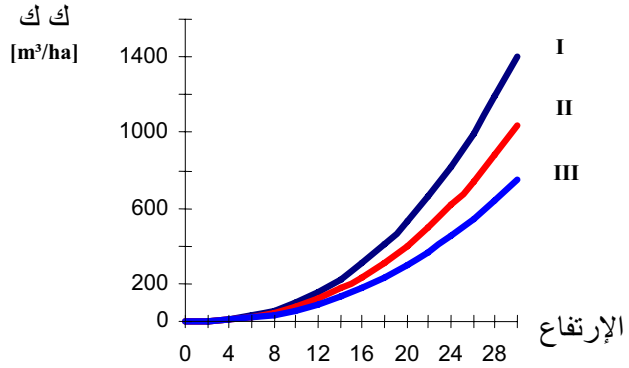
هنا يواجه تصميم النماذج الرياضية المعتمدة على طريقة تحليل الساق غياب معلومات مهمة عن الوضع (الإجتماعي) لهذه الأشجار والعلاقات التنافسية التي كانت موجودة في السابق.
من الشروط الأساسية لتطوير النظام المتعدد لتحديد درجات جودة الموقع وتوفر النوع والكم الأنسب من المعلومات هو أن تكون المعلومات الخاصة بالعلاقة بين الإرتفاع والعمر تكون قد تم الحصول عليها من مرابيع عينة دائمة تكرر قياس إرتفاعاتها السائدة على مدى زمني طويل، كما أن تكون مختلف المواقع ممثلة بمرابيع عينة دائمة. من مساوي مرابيع العينة الدائمة التكاليف العالية والإرتباط الزمني الطويل بالمرابيع وزمن الإنتظار الطويل اللازم لتوفر المعلومات.

مؤشر (درجات جودة الموقع) بإستخدام متوسط الزيادة السنوية الكلية

بالإضافة لقياس خصائص الموقع عن طريق الإرتفاع (النسبي والمطلق) فإن متوسط الزيادة السنوية الكلية (MAI) بالنسبة لحجم المخزون الخشبي الموجود تستعمل أيضا كأداة لتحديد درجة جودة الموقع. يعطي هذا النوع من القياس متوسط الزيادة في الحجم لكل سنة وهكتار، حيث يستعمل هنا أيضا إرتفاع المشجر والعمر كقيم لتحديد درجة جودة الموقع عن طريق متوسط الزيادة السنوية.
في المانيا يستخدم كل من متوسط الزيادة السنوية الاقصى (MAI_{max}) ومتوسط الزيادة السنوية في عمر 100 سنة (MAI 100)، حيث يعطي الأول متوسط الزيادة السنوية عند نقطة بلوغ القمة، مع العلم بأن هذه النقطة تعتمد على درجة جودة الموقع والمعاملات الفلاحية التي تطبق في المشجر، مما يجعلها نقطة غير ثابتة حتى دآخل النوع الشجري الواحد. أما متوسط الزيادة السنوية عند العمر 100 سنة فإنه يعطي متوسط الزيادة السنوية في هذا العمر. يرى نقاد فكرة إستخدام متوسط الزيادة السنوية لتصنيف درجات جودة الموقع أنها لا تعدو أن تكون صورة أخرى فقط لقياس درجة الجودة عن طريق الإرتفاع، إذ يمكن عند (إستخدام متوسط الزيادة السنوية وحده) الوصول الى نتائج خاطئة عن القدرة الإنتاجية للمشجر وذلك لأن متوسط الزيادة السنوية يتأثر كثيراً بالعمليات الفلاحية التي تطبق بالمشجر، على عكس الإرتفاع السائد.

مستوى الإنتاج:

بناءاً على قانون آيشهورن، فإن العلاقة بين الإرتفاع والإنتاجية الكلية لا تعتمد عل موقع المشجر. إتضح في وقت لاحق وجود سلسلة من التحفظات التي تثير الكثير من الشكوك في صحة هذا القانون، فقد وجد آسمان (1961) عن طريق متابعة طويلة المدى لمرابيع عينة للنوع الشجري (*Picea abies*) في مناطق عديدة، إجمالي إنتاجية متباين مع وجود نفس الإرتفاع. تعتبر الكميات الكلية للإنتاجية مستويات إنتاج (yield levels) مختلفة. الشكل (6.2) يوضح مثالاً للعلاقة بين الكمية الكلية للإنتاج والإرتفاع السائد لثلاثة مستويات إنتاج مختلفة.



الشكل (6.2): العلاقة بين الإنتاجية الكلية (ك ك إ) والإرتفاع السائد بالأمتار لثلاثة مستويات إنتاج (ك ك إ= الكمية الكلية للإنتاج، I ، II ، III = مستويات الإنتاج).

يعتبر جدول الإنتاج للنوع دوقلاس الذي صممه بيرقل (1985) مثالاً للتصنيف على أساس مستويات إنتاج، ولكل صف إنتاج رمز خاص به.
تأسست القاعدة الأساسية لتصميم جداول الإنتاج على إفتراض أن الكمية الكلية للإنتاج ك ك و التي يرمز لها بـــ (GWL) تعتمد فقط على الإرتفاع وأن الإرتفاع هو الآخر يعتمد على درجة جودة المشجر والعمر:

$$GWL = f(h)v\ h = f(\text{الجودة}) \text{ و } \Longleftrightarrow (\text{العمر}) \qquad GWL = f(\text{العمر والجودة}) \qquad (8.2$$

أدى إرتباط الكمية الكلية للإنتاج ودرجة جودة الموقع الى العلاقة التالية:

$$GWL = f(\text{العمر، مستوى الإنتاج، الجودة}) \qquad (9.2)$$

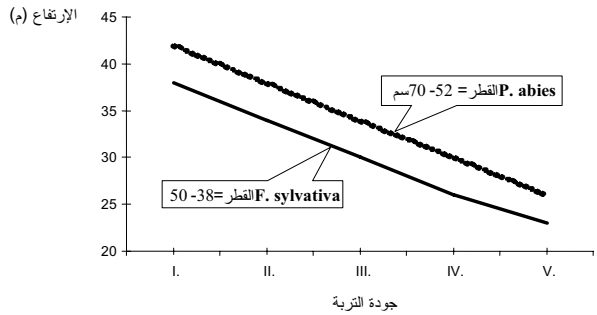
يمكن أن يؤخذ مستوىالإنتاج في الإعتبار كصفة مساعدة لتقديم القدرة الإنتاجية للموقع، فقط إذا أمكن إثبات أن الأمر يعلق بصفة لا علاقة لها بالمعاملات الفلاحية للمشجر. هنالك الكثير من الأمثلة التي توضح (جزئياً) الأثر الكبير للمسافات بين الأشجار ونوع التخفيف (الشلخ) على العلاقة بين الكمية الكلية للإنتاج والإرتفاع. نجد على سبيل المثال أن النمو في الإرتفاع لبعض الأشجار يتأثر بزيادة المسافات بين الأشجار دون أن يكون لذلك أثر على الزيادة في حجم المخزون الخشبي الواقف. عندما يتم فتح الغابة عبر عمليات تخفيف (شلخ) مكثفة تكون إرتفاعات الأشجار أقل مما لو كان التخفيف متوسط، والنتيجة هي: أنه لنفس الإرتفاع تكون المشاجر المفتوحه (عبر عمليات تخفيف مكثفة) ذات إنتاجية كلية أعلى. عند عمليات التخفيف المكثفة فإن الحجم الذي يتم الحصول عليه في وحدة المساحة أقل لنفس نمو الإرتفاع. من هنا يتضح جلياً تأثير درجة المعاملة الفلاحية للمشجر، إذ أنه يمكن الحصول على كميات إنتاج كلية متباينة لنفس الإرتفاع ونفس الموقع.
مع أخذ مؤشرات أخرى في الإعتبار، مثل شكل الساق والتعرض للعواصف، تتأكد أهمية فكرة مستويات الإنتاج. هنالك إمكانيات أكثر فعالية لعرض العلاقة المعقدة بين الإرتفاع السائد والكمية الكلية للإنتاج. إذا نظرنا الى الممارسة العملية في لغابات، فإن الإهمام ينصب في الأنواع المنتجة من لأخشاب وليس في الكمية (الحجم) بشكل مطلق. في مثل هذه الأحوال لا يمكن النظر الى فكرة مستويات الإنتاج إلا على أنها مرحلة فقط من مراحل تطور علوم الغابات.

التصنيف الديناميكي لدرجات جودة الموقع

إذا تم تصنيف درجات جودة الموقع بمساعدة معلومات تم الحصول عليها من مشاجر أخرى بها خصائص موقع و ظروف عامة مشابهة للموقع الذي يراد حديد درجة جودته، فإننا نتحدث عما يعرف بالتصنيف الديناميكي لجودة الموقع (Dynamic site quality classification). يستخدم التصنيف الديناميكي في المشاجر التي لا يسمح عمرها بتحديد درجة جودتها. قد يكون من الأسباب الداعية لاستعمال هذا النوع من التصنيف أن عمر المشجر الذي لا يراد تحديد درجة جودته لم يبلغ بعد الحد الأدنى الموجود في جدول الإنتاج أو أن الحصول على المعلومات اللازمة للتصنيف باهظة التكلفة مما يجعل الحصول عليها صعباً.

التصنيف في مشاجر متعددة الأعمار

يمكن إستخدم طرق التصنيف التي تم وصفها حتى الآن فقط في المشاجر ذات الأعمار المعروفة، أما الغابات مجهولة الأعمار (كالغابات الطبيعية والمقفولة أو الغابات المختلطة غير متساوية الأعمار) فإنها لم تجد من الإهتمام إلا القليل. أورد فينك وآخرون (1990) أنه لا توجد لمثل هذه الغابات طرق محددة لتحديد جودة الموقع. نتيجة للإهتمام المتزايد بمثل هذه الغابات في ألمانيا وأجزاء كثيرة من وسط أوربا ومعظم المناطق الإستوائية والمدارية، فإن هذه المسألة تستحق بعض الإهتمام. هنالك إسهامات لتصنيف الغابات المختلطة المتباينة الأعمار، فقد أورد فلوري أنه في حالة التطور الطبيعي في الغابة الطبيعية فإن متوسط الإرتفاع لكل صف (= قطر) يميل الى المساهمة في حفظ التوازن بشكل عام. بناءاً على هذه الفكرة فإنه من المناسب الإعتماد على الإرتفاعات المرتبطة بصفوف الأقطار لقياس درجة جودة الموقع. لا يهتم هذا النظام بالأشجار الضعيفة (بكل أشكالها) وذلك لان إرتفاعاتها متأثرة بالمنافسة و التغطية التاجية من الأشجار السائدة المجاورة لها. الشكل (7.2) يوضح النظام الذى إتبعه فلوري للتصنيف.



الشكل (7.2): نظام تحديد جودة الموقع في غابة طبيعية (غير خاضعة لإدارة) لنوعين من الأشجار. يعتمد النظام على صفي قطر 38- 50 سم و 52- 70 سم.

هنالك طريقة أخرى لتحديد درجة جودة الموقع في الغابات المختلطة ذات الأعمار المتباينة. تعتمد هذه الطريقة على معرفة زيادة أقطار الأشجار في حدة قياس الزمن (أومقلوب هذه الوحدة). إذا بلغت زيادة قطر الشجرة مثلاً 2سم في مدة قدرها 10سنوات، فهذا يعني أن الزيادة في القطر تبلغ 0.2 سم في العام. وبالتالي يحتاج هذا النوع الشجري لمدة 5 سنوات ليحقق زيادة في القطر قدرها 1.0 سم. بهذا فأن درجة جودة الموقع تكون دائماً أفضل كلما قلت الفترة التي تحقق فيها زيادة قطر معينة لنفس النوع الشجري ونفس الكثافة الشجرية. تتيح الإختلافات في زيادة القطر لمختلف المشاجر الفرصة للمقارنة وبالتالي تحديد درجة جودة المواقع. تجدر الإشارة الى هذا النوع من التصنيف يحتاج الى تكاليف عالية لاجراء عمليات الحصر، ومع ذلك فإنه لا يخلو من عدم دقة.

تصنيف جودة الموقع عن طريق عناصره

هذه مجموعة طرق غير مباشرة تستعمل كمحاولات لتحديد درجة جودة الموقع وتعتمد على عناصر الموقع والظروف المحيطة به. في هذا النوع من التصنيف يتم تقويم هذه العناصر وخصوصاً التربة والغطاء النباتي ومكونات المناخ.

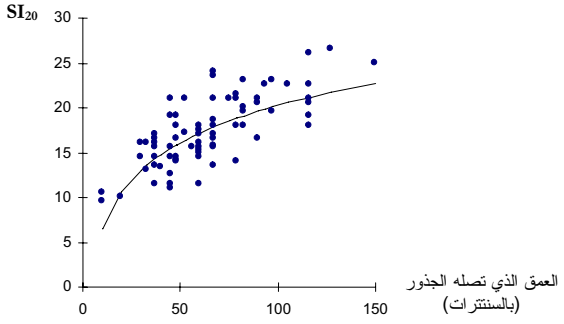
عنصر التربة

من الطرق الواسعة الإنتشار لتحديد درجة جودة الموقع للمشاجر إستعمال ما يعرف بالقيم التعريفية لمحتوى الكربون في التربة أهم علاقة معروفة حتى الآن في هذا الصد هي علاقة الكربون والنيتروجين(C/N_ Ratio) كلما زادت هذه النسبة كلما قل التبادل الأيوني، وبالتالي كلما قلت فرصة النباتات في الإستفادة من النيتروجين غير العضوي. إستطاع إيفرز وموسماير (1980) إثبات وجود علاقة قوية بين نسبة الكربون للنيتروجين ومتوسط الزيادة السنوية في عمر 100 سنة لمشاجر من النوع الشجري *(Picea abies)*. إشار إيفرز وموسماير (1980) أيضاً الى أن تقييم العلاقة بين المواد الغذائية للموقع على أساس خصائص التربة. وبالتالي تصنيف درجة جودة كل موقع، قابل للطبيق في كل منطقة.

بالإضافة الى نسبة الكربون للنيتروجين هنالك تعريفات أخرى، مثلاً نسب الكربون مع الفسفور (C/P_ Ratio) والكربون مع البوتاسيوم (C/K_ Ratio)والكربون مع الكالسيوم (C/Ca_ Ratio). توصل أيفرز ومسماير (1980) أيضاً الى العلاقة بين الكربون والفسفور والكربون والبوتاسيوم من جهة وبين متوسط الزيادة السنوية للنوع الشجري *(Picea abies)* أضعف بكثير مقارنة بالعلاقة بين متسط الزيادة السنوية ونسبة الكربون للنيتروجين.

يجب أخذ القيم التعريفية المفردة التي تتأثر بعوامل الطقس والجيولوجيا بحذر شديد، إذا استخدمت لقياس درجة جودة الموقع. إن إستخدام عناصر التربة لتحديد درجة جودة الموقع ليس بالموضوع البحثي الجديد، فقد نشر كارمن (1973) قائمة تحتوي على 793 نشرة عملية إهتمت بهذا الموضوع.

أثبت عدد من الكتاب أن عمق التربة، وعناصر أخرى مرتبطة بالتربة. تعد مؤشراً جيداً لتقييم إنتاجية الموقع. الشكل (8.2) يوضح مثالاً للعلاقة بين عمق التربة ودرجة جودة الموقع إعتماداً على الإرتفاع في عمر 20 سنة (SI20) لمشاجر من النوع *(Pinus ellottii)* في جنوب أفريقيا. حيث وجد أنه كلما زاد توغل جذور الشجرة الى أعماق التربة كلما زاد الإرتفاع.
يمكن أيضاً إستعمال مختلف العناصر الكيميائية والفيزيائية للتربة في نظام تحليل الإنحدار (Regression analysis) لتحديد درجة جودة الموقع.



الشكل (8.2): العلاقة بين العمق الذي وصلته درجة جودة الموقع في العمر 20 سنة (SI20) لمشاجر (Pinus elliottii) (إخذت من شيفر، 1988).

يجب التأكيد على أن النماذج الرياضية لتحليل الإنحدار تتناسب من حيث المبدأ لمرة وحداة فقط مع معومات محددة. تكون نتيجة التحليل في العادة جيدة جداً، وهنا تكمن قوة النماذج الرياضية لتحليل الإنحدار. من ناحية أخرى تكمن نقطة ضعف النماذج الرياضية لتحليل الإنحدار في أن درجة تناسب النموذج (Model fitting) التي تجرى مرة واحدة فقط ربما تكون معتمدة على عينة لم يتم إختيارها بالموضوعية المطلوبة (Non_ objective selection). في العادة لا يمكن مد النماذج الرياضية لتحليل الإنحدار خارج الإطار الذي تم حسابه، كما لا يمكن تعديل أو تحسين النموذج الرياضي لتحليل الإنحدار، لان ذلك يتطلب إضافة معلومات، وبالتالي ما يتم حسابه بعد ذلك يعتبر تحليلاً جديداً ولا علاقة له بما سبق من تحليل.
نظراً لهذه الظروف المحطية بالنموذج الرياضي لتحليل الإنحدار فقد بذل بعض الكتاب جهداً في أخذ عوامل تأثيرية محددة وجعل تأثيراتها تتراوح في المدى (0–1) وذلك لعدد محدد من عنصر الموقع. كمثال نذكر طريقة مؤشر الإنتاجية (Productivity index) التي إبتكرها هندرسون (1990) والطريقة تعتمد على خمسة من صفات التربة، فقد قام هندرسون بتصنيف درجات وجودها الى قيم نسبية تتراوح بين (0 و1) وأطلق عليها إسم عوامل الإكتفاء. في هذا العمل نفترض أن النمو الذي يحدث في أجزاء النبات اعلى الأرض يتناسب طردياً مع نمو جذوره دآخل التربة. يتأثر نمو النظام الجذري بوجود عناصر التربة الخمسة التي تم تحديدها. يتم حويل قيم هذه العناصر الى عوامل إكتفاء بطريقة مشابهة لتلك التي إستعملها كان (1995) وقد ورد ذكره آنفاً.

الغطاء الباتي التحتي

يستخدم الغطاء النباتي التحتي كتقليد قديم لتحديد درجة جودة الموقع في شمال أوربا. إنطلاقاً من فرضية أن كل العوامل المؤثرة على النمو في الغطاء النباتي تنعكس على الغطاء النباتي التحتي، فأنه يبدو منطقياً إعتبار أن الغطاء النباتي التحتي مؤشراً لدرجة جودة الموقع، فإن الغطاء النباتي التحتي يمثل مقياساً جيداً لدرجة جودة الموقع. بناءاً على ما ذكره فانكلاني (1992) فإن تحديد درجة جودة الموقع عن طريق الغطاء النباتي التحتي

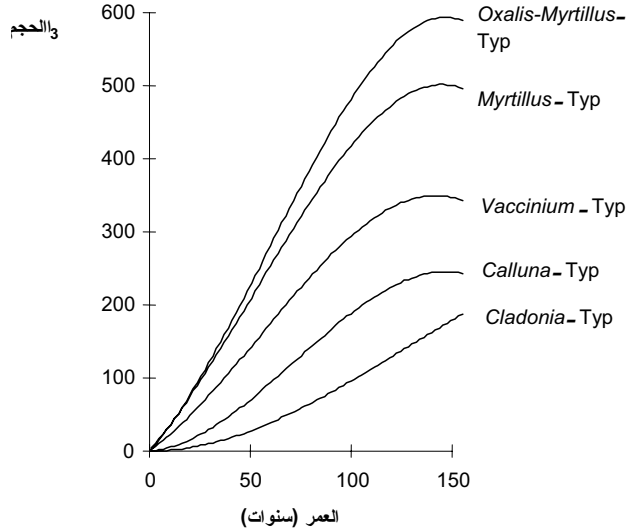
يمكن أن تتم بطريقين مختلفتين: طريقة التصنيف(Classification) وهي طريقة إبتكرها براون وبلانكيت وطريقة الترتيب (Ordination) وهي مبنية على إعطاء مؤشرات للموقع.

طريقة التصنيف

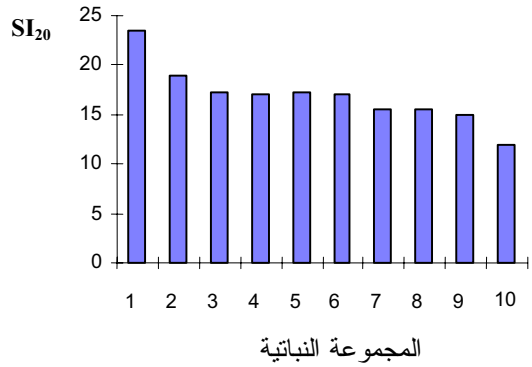
تتفق كل الطرق المستخدمة للتصنيف على أن الغطاء النباتي السائد (Climax vegetation) يمكن أن يقود الى تقسيم الموطن (Habitat) أو أنواع المشاجر (Stand types). من أشهر طرق التصنيف في هذا الصدد الطريقة التي تعمد على الأنوع النباية (Vegetation types) على منهج عالم الغابات كاجاندر. إستعمل كاجاندر (1909) عدداً من المجموعات النباية (Plant association) لتقييم القدرة الإنتاجية للموقع في فلند. الشكل (9.2) يوضح مثالاً لحجم المخزون الخشبي الواقف لمشاجر صنوبر مربطاً بالعمر وستة أنواع نباتية (اخذت من كيمنيس، 1987).

تجد طريقة كاجندر إهتماماً كبيراً في أوربا وشمال أمريكا. إيتكر شافر (1989) مثالاً لتصنيف درجة جودة الموقع بهذه الطريقة لمشاجر من الصنوبر (*Pinus elliottii*). الشكل (10.2) يوضح ذلك.

توجد المجموعة النباتية الأولى في الشكل (10.2) *(Stoebe plumosa/ Lachenalia spp/ Tetraria cuspdata/ Senecio juniperinus)* في أفضل المواقع، في حين أن المجموعة النباتية العاشرة توجد في أقل المواقع جودة و تحتوي عى الأنواع الشجرية *(Watonia fourcadei/ Berzebelia intermedia/ Clifforta stricta/ Pellaea chedrum)*



الشكل(9.2): حجم المخزون الخشبي الموجود بمشاجر (Pinus silvestris) في فلندا مرتبطاً بالعمر والنوع النباتي (الحجم بالمتر المكعب في الهكتار).



الشكل (10.2): التصنيف المطلق لدرجة جودة الموقع (بإستعمال الإرتفاع لمشاجر (Pinus elliottii) لعشر مجموعات نباتية في منطقة رأس الرجاء الصالح بجنوب أفريقيا).

طرق المؤشر:

تعتمد هذه الطرق على ترتيب أنواع شجرية محددة في شكل مجموعات (Ecological groups). في كل مجموعة توضع الأنواع التي تستجيب لدرجة جودة الموقع الموجودة بطرق متشابهة. هنالك طريقتان مختلفتان، الأولى والأكثر إستخداماً تقوم على أساس الإحتياجات اللازمة لإنتاجية الموقع إعتماداً على نباتات محددة (تمثل مؤشراً بيئياً). أما الطريقة الثانية فإنها تعتمد على بعض الصفات المورفلوجية للنباتات مثل عرض الإوراق وإرتفاع النبات. لا تتعارض الطريقتان إطلاقاً، بل من الممكن أن يعملان معاً في تناسق تام.

هنالك العديد من الأمثلة لتصنيف جودة الموقع على أساس الغطاء النباتي التحتي في بلدان بها الكثير من الأنواع النباتية الأرضية وبعضها لا يملك منه إلا القليل. يمكن عن طريق أنواع نباتية معينة تقدير حالة الضوء ودرجة الحرارة وكمية الماء والمواد الغذائية بإستخدام معيار متعدد الدرجات. عند ترتيب المؤشرات تلعب المنافسة من أي نوع نباتي دوراً حاسماً. يؤدي التنافس الحاد الى وجود إعداد قليلة جداً من أنواع نباتية معينة تظهر في مواقع محددة. الأنواع النباتية ذات القدرة الضعيفة في التنافس، لا تستطيع البقاء إلا في ظروف خاصة جداً، تعتبر ذات قيمة عالية جداً عند تقييم درجة جودة الموقع.

بالطبع تسمح الأنواع النباتية (منفردة) أن تعطي تقييماً للعلاقات المائية والغذئية في آفاق تربة (Soil horizons) محددة عندما تخترقها بواسطة الجذر.في حين تخترقها بواسطة الجذور. في حين تخترق جذور بعض الأنواع النبتية التربة الى عمق قريب (عدة سنتمترات) تمضي جذور بعض الأنواع النباتية الأخرى عبر عدد من آفاق التربة الى أعماق سحيقة. في الترب التي تغطيها طبقة حمضية يمكن وجود نباتات محبة للحموضة وبالتالي يمكنها أن تشكل جزءاً من التركيبة الإجتماعية للغطاء النباتي لتلك المنطقة وتعتبر مؤشراً للموقع.

هنالك مثال محدد لتصنيف درجة جودة الموقع على أساس طريقة ترتيب الغطاء النباتي التحتي، وتتم هذه بإستنباط مؤشر للنمو (Growth index) وتختصر (GI). في غابة مدارية في كوينزلاند بجنوب أفريقيا، وجدت علاقة قوية بين مؤشر النمو ووجود أو غياب أنواع نباتية معينة. نظراً لصعوبة التحديد الدقيق للنباتات المدارية، لجأ فانكلاي (1992) الى أخذ عنصر جيولوجي الى جانب النباتات التي رأى إعتبارها مؤشراً. يتم تحديد قيم المتغيرات إما بالقيمة (1) إن كانت موجودة أو بالقيمة (0) إن لم تكن موجودة، في حين أن المتغيرات الجيلوجية يمكن الإستعاضة بإحداها عن الآخر.

$$GI = \begin{pmatrix} 4.528 \times AL \\ 5.934 \times BV \\ 5.164 \times AV \\ 6.174 \times CG \\ 4.980 \times SM \\ 3.837 \times TG \end{pmatrix} + 1.144 \times BLO + 1.286 \times SBN - 1.020 \times VTX - 0.673 \times RAP + 1.027 \times BUA + 1.008 \times RBN - 1.223 \times CLL + 1.516 \times BGR$$

حيث:

جيولوجيا : AL = تربة طمية; BV =أساس بركاني;
AV = حمضية بركانية; CG = جرانيت خشن;
SM = رسوبية متحولة; TG = جرانيت ناعم ;

بيانيا BLO = Blush Silky Oak, SBN = Salmon Bean
VTX = Vitex, RAP = Rpanea,
BUA = Buff Alder, RBN = Rose Butternut,
CLL = Cinnamon Laurel, BGR = Brown Gardenai

المناخ

للمناخ تأثير كبير على نمو الغابات، وكما ذكر آنفاً فإن درجة جودة الموقع تؤثر في نمو الغابات، لذا فهنالك معلومات مناخية محددة بالقدرة الإنتاجية للموقع وهي التي يمكن إستخدامها للمساعدة في تحديد درجة جودة الموقع. لهذا الغرض تستخدم عادةً مؤشرات مناخ (Climate indices) وهنا يؤخذ عدد من عناصر المناخ في الإعتبار.

من أشهر هذه المؤشرات المؤشر المعروف بمؤشرالإنتاجية النباتية المرتبطة بالمناخ (Climate_ dependent vegetation productivity)، ويكتب إختصاراً (CVP) وقد إقترح هذا المؤشر بيترسون (1962). المعادلة (11.2) توضح كيفية حساب هذا المؤشر.

$$CVP = N \cdot \frac{Tv}{Ta} \cdot \frac{g}{360} \cdot \frac{Rp}{Rs} \qquad (11.2)$$

حيث:

N = المتوسط السنوي للأمطار (بالملمتر)
Tv = متوسط درجة الحرارة لأشد أشهر العام حراً (بالدرجات المئوية)
Ta = الفرق بين درجة الحرارة لأحر وأبرد شهر في السنة (بالدرجات المئوية)
G = عدد أيام السنة التي لا تقل درجة حرارتها عن 7 درجات مئوية
Rp = الإشعاع في القطب
Rs = الإشعاع في الموقع الذى يراد تصنيفه

تم إستعمال مؤشر بيترسون لتقدير إمكانية الإنتاج الخشبي في مناطق عديدة. الجدول التالي يوضح هذه المناطق.

الأماكن (المناطق)	م م/ السنة الهكتار	CVP
المناخ الصحراوي		25
المناطق الجبلية الباردة، الصحاري، المناطق المدارية الحارة	0–3	25–100
المناطق الباردة الرطبة، وسط وشرق اوربا والولايات المتحدة	3–6	100–300
جنوب الصين، الهند، أفريقيا، جنوب الولايات المتحدة، الأرجنتين، بوليفيا، غرب أوربا	6–9	300–1000
جنوب أمريكا، وسط افريقيا، الهند المدارية	9–12	1000–5000
المنطقة الإستوائية، الأمازون، الكنغو، ماليزيا	>12	> 5000

الجدول (2.2): الإنتاجية النباتية المرتبطة بالمناخ (CVP) والزيادة في الهكتار والسنة في عدد مناطق العالم (مأخوذة من بيترسون،1962). م م = متر مكعب

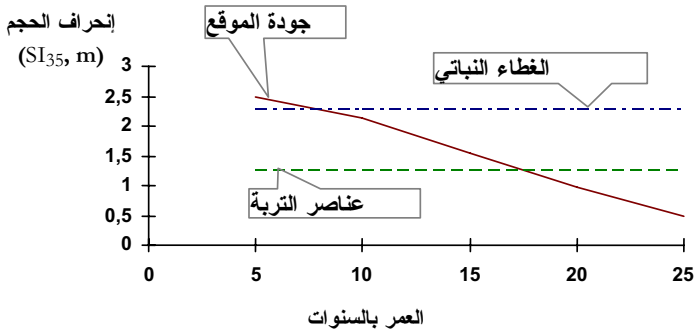
تمكن باردي وبوشو (1990) من إستنباط المعادلة الآتية لمشجر *(Fagus sylvatica)*. تربط المعادلة بين متوسط الزيادة السنوية والإنتاجية النباتية المرتبطة المناخ.

$$dGZ = 5.20 \cdot \log_{10}(CVP) - 7.25 \qquad (12.2)$$

هنالك مؤشر مناخي أسهل من هذا بكثير هو مؤشر لانغ (Lang factor)، والمقياس المستخدم هنا هو رطوبة المناخ Climate humidity وهو عبارة عن التناسب بين الأمطار بالمليمترات ومتوسط درجة الحرارة بالدرجات المئوية أثناء فترة الإخضرار (من مايو حتى سبتمبر).
من المشاكل التي تعوق إستخدام مؤشرات في هذا النظام (في شكل أرقام تناسبية) إنه يمكن وجود مؤشرات متساوية لنسب ارقام بسطها ومقامها مختلفة (مثلا 300/10 = 600/20) وهذا يشترط (يعني) ثابت هذه النسبة.
بالرغم من أن مؤشرات المناخ صممت لتوضيح الإنتاجية الخشبية في مناطق شاسعة، إلا أنها تتيح إمكانيات محدودة لتحديد درجة جودة الموقع في مشاجر غابية حقيقية. ففي الممارسة العملية تعطي نتائج خرائط الغطاء النباتي في المواقع معلومات مهمة. يمكن الإستفادة من المعلومات الناتجة من تخريط المواقع (site mapping)، وبالإستعانة بالمعادلات التاثيرية على النوع الشجري المحدد يمكن تحويل هذه المعلومات إلى معلومات ذات علاقة بالنمو.

مقارنة بين طرق تحديد جودة الموقع

يتطلب تقييم الطرق المختلفة المستعملة لتحديد درجة جودة الموقع وضوح الدافع أو الهدف من التصنيف. يعتبر تصنيف الموقع الى درجات جودة شرطاً أساسياً للتخطيط الغابي، فمن ناحية التصنيف على التنبؤ بالإنتاج المستقبلي ومن الناحية الأخرى يساعد علىتقييم الموقع نفسه والتأكد من الظروف المحيطة بالموقع لم يحدث بها اي نوع من التغير.
هنا يبرز السؤال: أي هذه الطرق (التي سبق ذكرها) هي الأدق لتحديد درجة جودة الموقع؟ يمكن الإجابة على هذا السؤال (فقط) إذا توفرت معلومات عن نسبة الخطأ في كل من هذه الطرق. بسبب عدم توفر مثل هذه المعلومات فإنه لا يمكن تقييم دقة التقدير. هنالك مصدر مقارنة متاح إقتراحه ماركيز (1991). الشكل (11.2) يوضح ذلك.



الشكل(11.2): إنحراف الحجم (ح) بالنسبة لمؤشر الموقع (SI35) للنوع الشجري (Pinus pinaster) في البرتغال إعتماداً على نوع التصنيف والعمر (غ = درجة جودة الموقع، ت = عمر المشجر بالسنوات)

وجد ماركيز أن عناصر التربة تعطي تقديرات أدق فيما يتعلق بإنتاجية الموقع مقارنة بعناصر الغطاء النباتي. يزداد التصنيف النباتي عن طريق الإرتفاع دقة، كلما قارب عمر المشجر العمر المرجعي للتصنيف.

إذا إستطعنا تعميم هذا النموذج فأنه من الأفضل أخذ كل المتغيرات التي لها علاقة بالنمو في الإعتبار (ما أمكن ذلك). أجريت عدة بحوث للوصول لهذا الهدف، وفي معظم الأحيان كانت النتيجة زيادة درجة عدم الوضوح. إستطاع موسماير وشوبفر (1972) تقدير قيمة متوسط الزيادة السنوية للنوع الشجري (*Picea abies*) بدرجة عالية من الدقة وقد إستعملا في ذلك خمسة متغيرات، في حين إستخدم شوقارت (1984) أربعة عناصر لتقليل النمو (Reduction factors) وذلك عند تصميم نموذج رياضي لتأثير هذه العناصر وهي: الضوء المتناثر ودرجة الحرارة والمحتوى الغذائي والرطوبة. من ناحية أخرى إتبع كيلوكاكي وآخرون (1993) منهجاً مماثلاً أطلقوا عليه إسم مضروبات النمو (Growth multiplication) وذلك للعناصر الآتية: الضوء ودرجة الحرارة والرطوبة والنيتروجين وقد إتبع كيمنس وآخرون ذات النهج مع الخوض في تفاصيل أكثر فيما يتعلق بالإمداد الغذائي.

لم يظهر اثر في هذه المقارنات للنماذج الرياضية في تحليل الإنحدار، بدلا من ذلك ركز الباحثون على المعلومات التي يتم جمعها روتينيا في إطار عمليات الحصر الغابي وتخريط الموقع وإستخدام هذه المعلومات بشكل فضل. يجب تحويل المعلومات التي تجمع (عادة) في شكل نوعي (مثل الإشارة الى كميات الماء الموجودة والمعلومات عن الغطاء النباتي) الى متغيرات كمية (عددية) وذلك بهدف الإستفادة منها في تصميم نماذج النمو.

من المؤكد أن تحسين الطريقة التي يتم بها تقييم الموقع تؤدي الى تحسين القدرة على التنبؤ بالنمو المستقبلي، إلا انه من غير الواقعي الإعتقاد بأن النمو يمكن تقديره على اساس عناصر الموقع لوحدها. من المؤثرات على نمو الشجرة المفردة (أيضا) محيطها المباشر وذلك فيما يتعلق بخصائص التربة الموضعية (تحت الشجرة مباشرة) والمسافات البينية للأشجار المجاورة. أخذ كل هذه المعلومات وتأثيراتها في الإعتبار، هو ما سيتعرض إليه هذا الكتاب في فصله الرابع.

3. مورفلوجيا أشجار الغابات

تهتم البحوث المتعلقة بعمل النماذج الرياضية التي تصف نمو الأشجار بمورفلوجيا الأجزاء المكونة للشجرة خصوصاً التاج (بإعتباره الجزء الذي تجرى فيه العمليات الحيوية المهمة مثل النتح والتركيب الغذائي)، والساق (الذي يشكل الجزء الإقتصادي في الشجرة) والجذور (التي تعمل على سحب الماء والمواد الغذائية الذائبة الى أعلى الشجرة). سنتعرض في هذا الفصل الى أهم وظائف هذه الأجزاء وفي النهاية سنورد بعض الأمثلة لنماذج رياضية مورفلوجية (Morphological models)، والتي بدأت تحتل موقعاً متقدماً في تصميم النماذج الرياضية للغابات.

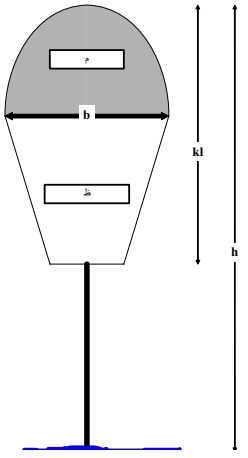
1.3. التاج

الوظائف الأساسية للتاج، كحامل للأوراق والزهور والثمار، هي القيام بالعمليات الحيوية والنتح، الشرط الذي يجب توفره للبحوث المرتبطة بالنمو هو عملية التمثيل الضوئي التي ترتبط مباشرة بعملية النتح. يلعب النتح دوراً أساسياً في ثبات العصارة النباتية داخل النبات، وهذه العصارة هي التي تقوم بإمداد الأوراق بالماء والغذاء، موفرة بهذه الطريقة المقومات اللازمة لعملية التمثيل الضوئي.

ليس للتاج بنية ثابتة، إذ تظهر في كل عام براعم جديدة. يؤدي هذا التغيير في كل مرة الى توزيع جديد للأوراق. يعتبر التنافس على المساحة المرتبطة بحياة الأشجار داخل المشجر. أي الحاجة المتزايدة للمساحة اللازمة للحياة بتقدم عمر الأشجار، من الأسباب الاساسية لإعادة التوزيع، فالأشجار تحتاج الى زيادة المساحة على مستويي الجذور والتاج. مع إحتدام التنافس تموت بعض الأشجار الضعيفة، تاركة المساحات التي كانت تحتلها للأشجار الأقوى. تتسابق الأشجار في النمو ويزاحم بعضها بعضاً في الصراع على البقاء. تعاني الأشجار الضعيفة من هذه المنافسة وذلك عبر ظلال الأشجار القوية المجاورة وتكون المنافسة أشد ما تكون في منطقة الغطاء التاجي للشجرة. هنالك بعض الصعوبات التي تواجه التحديد الدقيق لشكل التاج للشجرة الواقفة، لذا فإن تحليل التاج (Crown analysis) لتحديد مواضع الفروع في الشجرة وزوايا إتصالها بالساق ودرجة إستقامتها تتم (حتى الآن) في الأشجار بعد إسقاطها. تساعد مثل هذه التحاليل على معرفة تطور التاج وتساعد أيضاً في وضع أساس لتصميم النماذج الرياضية للتيجان.

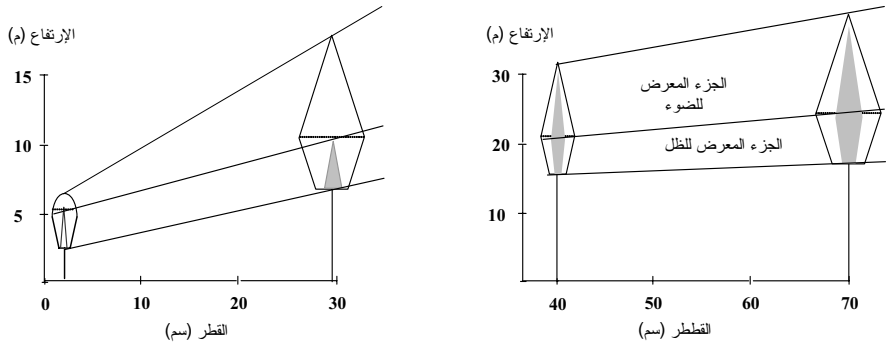
في إطار وصف التاج وتصميم نموذج رياضي له، فإنه من المهم التمييز بين الأشجار المحبة للضوء (Light-demanders) وتلك التي تملك القدرة على إحتمال الظل (Shade-demanders) وكذلك التمييز بين أشكال التيجان في الحالتين. على الرغم من وجود إختلافات مورفلوجية واضحة بين الأشجار المحبة للضوء وتلك التي تتحمل الظل، إلا أنه بين هذه وتلك كمية كبيرة من التدرجات، وأنه في نفس التاج توجد فروقات واضحة بين أجزاء التاج المعرضة للضوء وتلك الموجودة في الظل.

الشكل (1.3) يوضح شكل تخطيطي مبسط لتاج شجرة وبه عناصر قابلة للقياس وهذه العناصر مهمة بالنسبة للعمل الحقلي للغابات حيث يحتاجها الإنسان لحساب الزيادة ولتقييم درجة إستقرار المشجر (Stand stability).



الشكل (1.3): شكل تخطيطي لتاج شجرة وفيه (b) = عرض التاج، (k_1) = طول التاج، (h/k) = درجة إمداد التاج (م= الجزء من التاج المعرض للضوء، ظ= الجزء من التاج المعرض للظل)

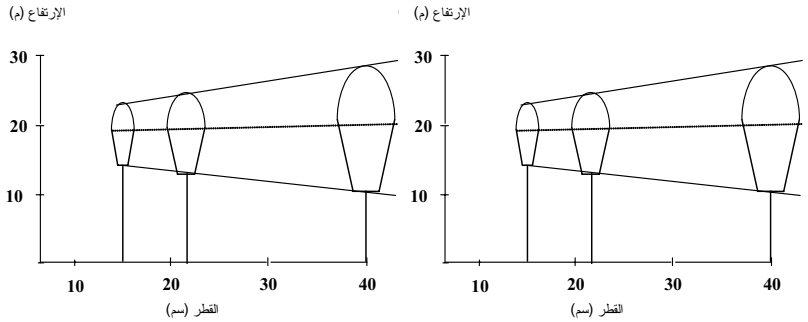
يوضح القطاع العرضي للتاج (الشكل 2.3) التفاوت في شكل التاج لأشجار في صفوف أعمار وصفوف أقطار مختلفة لمشجرين من أشجار الصنوبر إعتماداً على العمر والمعاملات الفلاحية. الجزء الداخلي في الشكل (2.3) (أي المنطقة في وسط التاج) هو الجزء الخالي من الأوراق، وهو الجزء من التاج الذي لا يتوفر فيه الحد الأدنى من الضوء اللازم لبقاء إعضاء التركيب الغذائي على قيد الحياة. يتفاوت هذا الجزء في مداه، معتمداً في ذلك على طول الساق ونوعه وعمر الأوراق وحالة المشجر.



الشكل (2.3): توزيع التاج الى جزء معرض للضوء وآخر في الظل.

الجزء المظلل يوضح المنطقة الخالية من الأوراق ويعتمد التوزيع على العمر وحالة المشجر لنوعين من الصنوبر. الى اليسار: من مشجر عمره 25 سنة (عالي الكثافة الشجرية). الى اليمين من مشجر عمره 122 سنة (قليل الكثافة الشجرية).

يتغير شكل التاج مع تقدم العمر نظراً للزيادة التي تطرأ على الفروع الجانبية. يتفاوت هذا التطور إعتماداً على العمر والنوع الشجري. تتميز الأشجار ذات الأوراق العريضة (مع تقدم العمر) بإنتهاء الساق الأساسي ونشوء سيقان جانبية (فروع كبيرة) متساوية الأحجام تقريباً وتعمل معاً على تحديد شكل التاج. تؤدي التأثيرات الجانبية الأخرى ، مثل ميلان الأرض في إتجاه معين ووجود مساحة خالية (بجوار الشجرة) على جانب واحد وتأثير الرياح والأصابات الى أشكال تاجية مختلفة عما سواها وتعتبر هذه حالات خاصة.
تؤثر المعاملات الفلاحية كثيراً على تطور التاج. من المعروف أن التاج يتمدد إستجابة لعمليات التخفيف (الشلخ) نظراً للزيادة في مساحة النمو التي تتوفر للشجرة نتيجة إزالة أشجار من حولها. تعتمد إستجابة التاج لزيادة حول الشجرة بشكل أساسي الى الإجابة على هذا السؤال الآتي: هل بلغ نمو الإرتفاع قمته؟
الشكل(3.3) يوضح مشجرين أخضعا لمعاملات فلاحية مختلفة. في عملية التخفيف من اسفل تقطع كل الاشجار الصغيرة (الجزء الأسفل من المشجر)، وبهذا يصير المشجر مكوناً من طبقة واحدة فقط. وهي الطبقة العليا وتظل تيجان الأشجار المتبقية كبيرة. في حالة التخفيف من اعلى يظل معظم الجزء الأسفل من المشجر موجوداً وتقطع أشجار من الجزء الأعلى منه (جزء من الأشجار السائدة وشبه السائدة)، وبالتالي تكون تيجان الأشجار المتبقية بعد التخفيف صغيرة نسبياً.



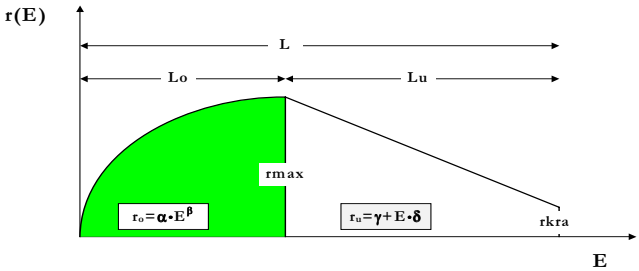
الشكل (3.3): المستوى التاجي لنوعي التخفيف لمشاجر النوع الشجري (Fagus sylvatica) في سويسرا. الى اليسار: التخفيف من أسفل، الى اليمين: التخفيف من أعلى.

أورد كرامر (1988) مثالاً آخر لتأثير المعاملات الفلاحية على تطور التاج. ثبت من خلال التجارب أن القيام بعمليات التخفيف مبكراً تزيد من النسبة المئوية لتيجان الأشجار ويؤثر كل ذلك إيجابياً على إستقرار المشاجر من خلال إستقرار الأشجار المفردة فيه.

يعتبر الشكل الهندسي (المعماري) للتاج عنصراً مهماً لتصميم النماذج الرياضية للنمو في المشاجر التي تتكون من عدة أنواع شجرية (مختلطة) ومتعددة الأعمار التي يتأثر نموها بالظلال الواقعة عليها والتنافس التاجي الجانبي من الأشجار المجاورة. لتحديد العلاقات التنافسية في مشجر، فإن إستخدام نماذج رياضية للتاج تعتبر كافية. هنالك عدد من التجارب في هذا الصدد.

للوصف المثالي لشكل التاج بواسطة الأشكال الهندسية. يجب أولاً تقسيم الأشجار الى عريضة الأوراق وإبرية الأوراق، كما يجب أيضاً التقسيم الى تاج مواجه للضوء وآخر تحت الظل. لوصف الجزء من التاج المعرض للضوء فإن المنحنى المحدب (Parabola) هو الأقرب ويناسب أيضاً الأشجار ذات الأوراق الإبرية. أما في النموذج الرياضي للجزء من التاج المعرض للظل (في كلا النوعين من الأشجار) فيمكن إستخدام معادلة المنحنى المحدب أو المخروط المنتفخ من أسفل (Nailed)، أما نسبة طول الجزء المعرض للضوء للجزء الموجود في الظل فإنه يعتمد على الوضع الإجتماعي دآخل المشجر.

الشكل (3.4) يوضح نموذج رياضي صممه الألماني بريتش وقد تم تطويره ليستعمل لثلاثة أنواع من الأشجار. لحساب الشكل الجانبي للتاج تم إستخدام المعادلة التراكمية(Exponential function)، أما بالنسبة للجزء الموجود في الظل فقد إستخدمت معادلة الخط المستقيم. اعتبر الجزء الأعلى من التاج كمقدمة المخروط بالنسبة للصنوبر من النوع(*Picea abies*) وتكعيبي للنوع (*Fagus sylvatica*) ومحدب تربيعي للنوع (*Abies alba*). أما بالنسبة للأنواع الثلاثة المذكورة أعلاه فقد أعتبر الجزء من التاج الموجود في الظل شبيهاً بالجزء المتضخم من المخروط.



الشكل (3.4): النموذج الرياضي لشكل التاج، وفيه: (E)= نصف قطر التاج بالأمتار، ويبعد مسافة (Em) من الشجرة، (ro) و(ru)= نصف قطر التاج في الجزء المواجه للضوء والجزء الموجود في الظل على الترتيب، (r_{max})= أكبر قطر للتاج، و(rkra) = نصف قطر التاج عند نقطة إرتكازه، α، β، γ، δ هي ثوابت تعتمدعلى النوع الشجري. الجدول (1.3) يوضح النموذج الرياضي للأنواع الشجرية الثلاثة.

النوع	الجزء من التاج المعرض للضوء			الجزء من التاج الموجود في الظل		
	α	Lo	β	γ	δ	rkra
Picea abies	$r_{\max}/Lo$	L * 0.66	1.00	$r_{\max}-d\cdot Lo$	$\frac{r_{kra}-r_{\max}}{L-Lo}$	$r_{\max}$ * 0.50
Fagus sylvatica	$r_{\max}/\sqrt[3]{Lo}$	L * 0.40	0.33	$r_{\max}-d\cdot Lo$	$\frac{r_{kra}-r_{\max}}{L-Lo}$	$r_{\max}$ * 0.33
Abies alba	$r_{\max}/\sqrt{Lo}$	L * 0.50	0.50	$r_{\max}-d\cdot Lo$	$\frac{r_{kra}-r_{\max}}{L-Lo}$	$r_{\max}$ * 0.50

الجدول (1.3): ثوابت النموذج الرياضي للتاج لثلاثة أنواع شجرية (أخذ من بريتش،1992).

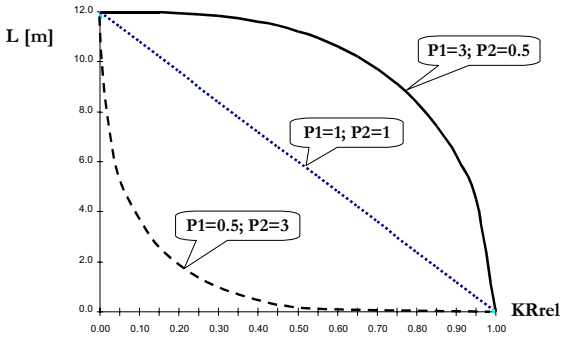
بهذا من الممكن، وفي إطار المعلومات المتاحة من خلال عملية حصر (التي تحتوي على طول وعرض التاج) تصميم نماذج رياضية للتاج، وبالتالي حساب درجة التنافس في المشاجر ذات الأعمار المتعددة، مع الأخذ في الإعتبار التزاحم على الجوانب، والتظليل من خلال الأشجار المجاورة (المنافسة).
هنالك طريقة أخرى إبتكرها كنيدلر (1986) تعتمد على ثابتين وتستعمل لحساب المساحة الخارجية للتاج (المعادلة 1.3).

$$h(r) = L \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{r_{max}} \right)^{p_1} \right]^{p_2} \qquad (1.3)$$

حيث:

L = طول التاج (بالمتر)
$r_{\max}$ = أكبر نصف قطر للتاج (بالمتر)
r = نصف قطر التاج (بالمتر)
h(r) = أعلى نقطة لسطح التاج عند نصف القطر (r) (بالمتر)
P_1, P_2 = ثوابت الشكل (يتم الحصول عليها تجريبياً)

يساعد النموذج الرياضي للتاج في حساب الجزء (من التاج) المواجه للضوء فقط، ويناسب كل أشكال التيجان وذلك بعد ثابتي النموذج. الشكل (5.3) يصف التاج بإستخدام نموذج رياضي ذي ثلاث ثوابت.



الشكل (5.3): جانب من التاج بإستخدام ثلاث ثوابت حسب معادلة كنيدلر. (L) = طول التاج بالأمتار، (Krrel)= نصف القطر النسبي للتاج.

تمكن أوتوريني (1991) من حساب شكل تاج شجرة الدوقلاس بإستخدام معادلتي تحليل الإنحدار البسيطتين (المعادلة 2.3، الشكل 6.3).

$$L = 11{,}6 \cdot \ln\left(\frac{E}{20} + 1\right) \qquad (2.3)$$

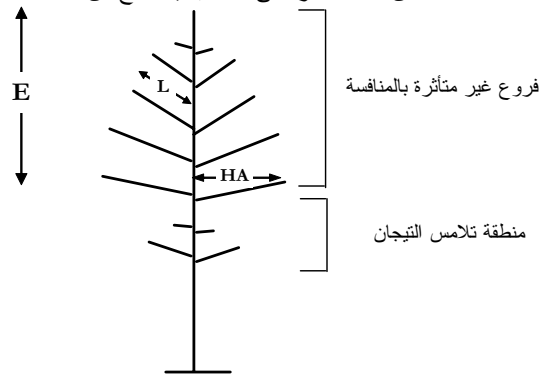
$$HA = 0{,}79 \cdot L \qquad (2.3)$$

حيث:

L = طول الفرع (بالسنتمتر)

HA = المسافة بين قاعدة الفرع وقمته (بالسنتمتر)

E = المسافة من قمة الشجرة الى نقطة بداية التاج من أسفل



الشكل(6.3): وصف شكل التاج لشجرة الدوقلاس (أخذت من أوتوريني، 1991)

تصلح معادلة أوتوريني (بشكل خاص) لحساب شكل الأشجار ذات الأوراق الإبرية. بشكل عام يمكن تصنيف التجارب التي تساعد على وصف التاج الى مجموعتين، تحتوي المجموعة الأولى على نماذج رياضية لحساب طول التاج.

1. Monseurd (1974)

$$KA = h * e^{\left(b_1 * h^{b_2} * d\right)} \qquad (4.3)$$

2. Biging u. Dobbertin (1995)

$$KA = h * \left[1 - e^{-\left(b_1 + b_2 * Ghag + b_3 * \frac{h}{d_{0.9}}\right)}\right] \qquad (5.3)$$

3. Nanel (1999)

$$KA = h * \left[1 - e^{-\left(c_1 + c_2 * \frac{h_i}{di}\right)^2}\right] \qquad (6.3)$$

4. Dursky (2000)

$$KA = h * \left(0.30 * + \left[1 - e^{\left(a_1 * \left(\frac{h}{d} - 0.4\right)\right)}\right]\right) \qquad (7.3)$$

حيث:

Ka = إرتفاع التاج (بالمتر)
$d_{0,9}$ = القطر عند 0.1 من إرتفاع الشجرة (بالسنتمتر)
h = إرتفاع الشجرة (بالمتر)
G_{hag} = المساحة القاعدية للمشجر الكلي (أي قبل عملية التخفيف) (بالمتر المربع في الهكتار)
$a_1\ b_1\ c_{1,2,3}$ = ثوابت

أما المجموعة الثانية فإنها تحتوي على نماذج رياضية تساعد على حساب الدرجة التاجية (CR) أو الجزء الذي يمثله التاج (من الغطاء التاجي بالمشجر). تنتمي لهذه المجموعة إسهامات هزيناور و مونسيرود (1996) وشتيربا (1995، 1997). يقرأ النموذج الرياضي الذي صممه شتيربا لحساب الجزء الذي يمثله التاج للنوع الشجري (*Picea abies*) كالاتي:

$$CR = \frac{1}{1 + exp(\ a_0 + \sum_i a_i \cdot STO_{\ i} + \sum_j b_j \cdot Größe_{\ j} + \sum_k c_k \cdot KONK_{\ k}\ )} \qquad (8.3)$$

حيث ان (CR) = الجزء الذي يمثله التاج و(STO) = قيمة تعبر عن عناصر الموقع و(DBH) = تعبر عن قطر الشجرة عند مستوى الصدر و (KONK) تعبر عن التناقس على مستوى التاج.
طور قادو و كورول (2002) نموذجاً رياضياً للتاج لمشاجر من النوع (*picea abies*) في أوكرانيا. إعتمدت تجاربهما على معلومات من 107 شجرة أجريت لها عمليات تحليل كلي للساق. شملت الدراسة 40 مشجراً كانت تخضع لمعاملات فلاحية مختلفة. تم التوصل للنموزج الرياضي عن طريق معادلات غير خطية ويمكن عن طريقها حساب طول التاج وعرضه ومساحته. يمكن حساب الدرجة التاجية (CR) بإستعمال المعادلة الآتية.

$$CR_1 = e^{-\sqrt{a_0 + \frac{a_1 * BHD^{\,2} - \left(a_2 * \ln(N * BHD) + a_3 * \ln\left(\frac{BHD^{\,2}}{BAL}\right)\right)}{BHD}}} \qquad (9.3)$$

$$CR_2 = e^{-\sqrt{a_0 + \frac{a_1 * BHD * H + a_2 * e^{\frac{a_3}{\ln\left(\frac{N}{BHD}\right)}} + a_4 * \ln\left(\frac{BHD * H}{BAL}\right) + a_5 * e^{\frac{H}{BHD}}}{H}}} \qquad (10.3)$$

حيث:

CR = الدرجة التاجية
H = إرتفاع الشجرة (متر)
BHD = قطر الشجرة عند مستوى الصدر (سم)
N = عدد الأشجار في الهكتار
BAL = مجموعة المساحات القاعدية للأشجار الأكبر حجماً
a_0 .. a_5 = ثوابت
الثوابت هي:

(CR_2) أخذ إرتفاع الشجرة في الإعتبار						**(CR_1)** بدون أخذ إرتفاع الشجرة في الإعتبار			
a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_0	a_1	a_2	a_3
6,4129	-2,1228	6,6915	-1,9675	0,0484	-0,3461	2,6156	-1,8627	0,0341	-0,2403

يتاثر عرض وطول التاج بكثافة المشجر والعمر وعناصر الشجرة القابلة للقياس (الإرتفاع، القطر عند مستوى الصدر ومجموع المساحات القاعدية للأشجار السائدة). هنالك علاقة قوية بين عرض التاج والقطر عند مستوى الصدر وإرتفاع الشجرة. تؤكد هذه العلاقة التجارب الأخرى التي تطرقنا لها في السابق. من ناحية أخرى فقد تم تطوير النموذجين الآتيين لحساب عرض التاج (CD):

$$KD_1 = a_1 * e^{\left(a_2 + a_3 * \ln(N * BHD) + \frac{a_4}{\ln(BAL * BHD)} + \frac{a_5}{BHD} \right)}$$

$$KD_2 = a_1 * \ln(N * BHD) * e^{-\left(a_2 + a_3 * e^{-\left(\frac{H}{BAL * BHD} \right)} + \frac{a_4}{\ln(H * BHD)} + a_5 * \ln(BHD) \right)}$$

نظراً لعدم توفر كل المعلومات، لزمت الإشارة الى أن هذه الحالة تتطلب معرفة أن التكلفة المرتبطة بتطبيق هذه النماذج الرياضية متفاوتة. لذا فإن إختيار النموذج الذي سيطبق يعتمد على نوع المعلومات المتوفرة. الجدول أدناه يوضح قيم الثوابت لهذا النموذج الرياضي.

المعادلة	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
CD1	2,3846	0,0671	0,0495	-8,887	0,2854
CD2	0,5391	0,1117	0,0029	6,0651	-0,2601

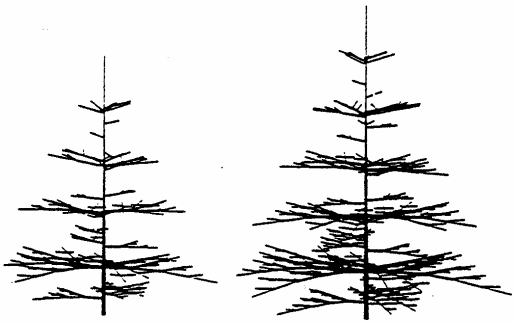
تتراوح الدرجة التاجية بين 0.2 و0.7 وهي تتأثر عادة بالمساحة المتاحة للشجرة ووضعها الطبقي (أي عمرها). تبلغ النسبة المئوية للخطأ في كل من المعادلتين أعلاه حوالي 12%.
يمكن إستخدام النماذج الرياضية للتاج للمساعدة في صفات أخرى مرتبطة بالتاج، مثل مساحته الخارجية (Cm) من طول التاج (طول التاج= الدرجة× الإرتفاع) ونصف قطر التاج (Cr) وهو يساوي قطر التاج (CD) مقسوماً على 2).

$$Km = \frac{\pi * Kr}{6 * KL^2} * \left[\left(4 * KL^2 + Kr^2\right)^{\frac{3}{2}} - Kr^3 \right] \qquad (13.3)$$

حيث:

Cm = المساحة الخارجية للتاج (بالمتر)
Cr = نصف قطر التاج (بالمتر)
CL = طول التاج (بالمتر)
π = ثابت رياضي (3.14)

يساعد تصميم النماذج الرياضية للتاج، خصوصاً تفريد الأشجار على فهم حركة الماء دآخل النبات وبالتالي يساعد في تعميق المعرفة بالنتح وتأثيره على العمليات الحيوية. هنا يتضح الرابط بين العمليات الفسيولوجية والبيوكيميائية والمورفلوجية. من الممكن إجراء تجارب في هذا الإتجاه بغرض فهم أفضل للمخاطر التي يتعرض لها النبات، مثل فقدان الأوراق في أجزاء معينة من التاج ومحاولة ربط ذلك بالماء وحركته دآخل النبات.
هنالك برامج حاسوبية لتصميم البناء الهندسي لفروع الأشجار و من الممكن إستخدامها، مثال لذلك تصميم التاج لشجرة الصنوبر (*Picea abies*) وفي عمر 5 و6 سنوات (الشكل 6.3). صمم عدد من العلماء برامج حاسوبية تصف بناء التاج أو أجزاء محددة منه.



الشكل (6.3): الشكل الهندسي (المعماري) للصنوبر (Picea abies) في عمر 5 و6 سنوات بإستعمال البرنامج الحاسوبي الذي صممه كورت (1992).

هنالك طرق متشابهة في التجارب التي قام بها سوزوكي وآخرون (1992)، جايدا (1995) وغيرهم حيث أعتمدوا في تصميم النماذج الرياضية على معلومات تجريبية تختص بتوزيع زوايا الفروع وأطوالها وأحجامها.

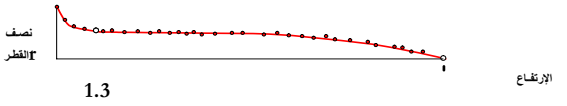
2.3 الساق

الساق هو الجزء من النبات الذي ينمو أعلى الأرض ويحمل الأوراق، ولا تعتبر الفروع جزءاً منه. يساعد الساق على إستقرار الشجرة ويقوم بوظيفة حمل الفروع وأجزاءها التي تقوم بالعمليات الحيوية، كما يحمل أيضاً الزهور والثمار ويمثل الوعاء الناقل للماء والمواد الغذائية من الجذور الى التاج. كما أنه يقوم بتخزين المواد الإحتياطية ويعمل على التخلص من المواد التي لا يحتاجها النبات.

يمثل الساق أهم جزء إقتصادي في الشجرة، وهذا يجعل العمل على تقدير (حساب) حجم الساق وتصنيف أخشابه هدفاً اساسياً في البحوث التطبيقية للغابات.

عند تقدير توزيع أنواع الخشب في الشجرة الواقفة يكون قد تم الإيفاء بالشرط الأساسي للتنبوء بالإنتاج الخشبي، ومن ثم تقييم ما يجب القيام به في المشجر الغابي. يرتكز هذا التقدير على معرفة شكل الساق (بالإضافة الى أشياء أخرى).

من المناسب وصف ساق الشجرة عن طريق منحنى إنسيابي (Taper curve) حيث يصف هذا المنحنى المظهر الخارجي للساق، ويكون شكله واضحاً، إذا تم نشر (شق) الساق طولياً الى نصفين. الشكل (7.3) يوضح مثالاً للشكل الخارجي لساق شجرة (شكل مثالي). يمكن تغيير هذا الشكل بتغيير الثوابت الموجودة في النموذج الرياضي.



الشكل (7.3): شجرة قطعت طولياً. إرتفاعها 30 متراً وقطرها 33سم.

معامل الشكل

يمكن تحديد شكل الأشجار الواقفة بعدة طرق. معامل الشكل (Form factor)، على سبيل المثال هو معامل تخفيض يصف نسبة الحجم الحقيقي الى حجم مثالي ممثلاً بإسطوانة حجمها بالمتر المكعب يساوي حاصل

ضرب طول الشجرة (بالمتر) في مساحتها القاعدية (بالمتر المربع). يستفاد من القيمة الناتجة من هذه النسبة في حساب حجم الساق. يستخدم مصطلح معامل الشكل خطأ، لان معامل التخفيض الذي تحدثنا عنه لا يصف الساق في حقيقة الأمر، وإنما يصف درجة وجود الخشب بالشجرة (Degree of woodiness) ولكن نظراً لسهولة الحصول عليه سمي معامل الشكل. بصورة عامة فإن معامل الشكل يقل مع زيادة العمر ويزيد مع زيادة الكثافة الشجرية .

ثابت الشكل والإنتفاخ

يحصل الإنسان على وصف أكثر دقة لشكل الساق عن طريق ما يعرف بثابت الشكل (Form quotient)، وهو عبارة عن النسبة بين أقطار الساق في منطقتين مختلفتين على طول الساق. يمثل مجموع هذه النسب وصفاً للشكل العام للساق، يعرف بسلسلة الإنتفاخات.

يمكن وصف شكل الساق عن طريق نموذج رياضي بدلاً عن النسب بين الأقطار. في هذه الحالة يمكن إستعمال العلاقة بين قطرين عند مستوى الصدر والقطرعند أطوال نسبية محددة. يمكن حساب ثوابت هذه العلاقة بمساعدة معادلة متعددة الدرجات (متعددة القوى).

من الطرق المفضلة وصف شكل الساق ما يعرف بالمعادلات ذات القوى التصاعدية (Spline functions) المعلومات المطلوبة للحساب هي الأقطار والإرتفاعات في عدد من النقاط على طول الساق. في هذه الطريقة يؤخذ الساق قطعة قطعة مع إنتقال إنسيابي من منطقة الى أخرى تفادياً لحدوث أي فراغات في شكل الساق يجب أن تكون كل النقاط على مدى متساوي. لهذا الغرض تستخدم المعادلة ذات القوة التكعيبية المعادلة (14.3)

$$f_i(x) = a_i + b_i(x - h_i) + g_i(x - h_i)^2 + d_i(x - h_i)^3; \in [h_i, h_{i+1}] \qquad (14.3)$$

يسمح معامل الشكل بإعطاء معلومات عامة عن شكل الساق معتمداً على العمر والكثافة الشجرية. بهذه الطريقة لا يمكن وصف الشكل العام للساق. يمكن أن يتم الوصف بشكل افضل عن طريق سلسلة التغيرات أو عن طريق تجزئة الساق الى قطع أو عن طريق معادلات المخروط. يمكن لهذه النماذج الرياضية أن تعطي وصفاً جيداً للشجرة المفردة، ولكنها لا تستطيع أن تعطي فكرة عن تأثير الموقع وخصائصه ولا عن المعاملات الفلاحية بالموقع وتاثيرها على شكل الساق. كحل وسط بين هذين الخيارين يمكن الوصول لوصف شكل الساق عن طريق تصميم نموذج رياضي قليل الثوابت. هنالك العديد من العمادلات التي يمكن إستعمالها لتحقيق ذلك، مثلا النموذج الرياضي الذي صممه بريسلر (1965) وإستعمله ديمرشالك (1973)

$$d(h)^2 = \alpha \cdot D^2 \left(\frac{H - h}{H} \right)^{\beta} \qquad (15.3)$$

حيث:

d(h) = قطر الساق (بدون لحاء) بالسنتمتر عند إرتفاع (h) على الساق

D = القطر عند مستوى الصدر (محتوياً اللحاء) بالسنتمتر

H = إرتفاع الشجرة بالمتر

β,α = ثوابت معادلة الساق

وبإعادة صياغة المعادلة (15.3) وجعل الإرتفاع (h) موضعاً للقانون نحصل على :

$$h = H - H\left\{ \frac{d(h)^2}{\alpha \cdot D^2} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \qquad (16.3)$$

تساعد المعادلة (15.3) على حساب القطر إذا عرف طول الساق، في حين أن المعادلة (16.3) تستعمل لحساب الإرتفاع إذا عرف القطر.

مثال (1):
في تجربة إجريت دآخل مشجر مكون من النوع الشجري دوقلاس تم الحصول على الثوابت الآتية:
α =0.9573 و β = 1.2850
أ. أحسب القطر عند إرتفاع 10 أمتار، إذا كان القطر عند مستوى الصدر= 20 سم وإرتفاع الساق= 22متر.
ب. في أي إرتفاع على الساق يساوي القطر 7سم بالضبط؟

مثال (2):
البرنامج التالي (shaft) يحسب لشجرة واقفة (قطرها عند مستوى الصدر 16سم وإرتفاعها 18متر) الجحم لكل قطعة من الساق طولها 2.25م حتى الحد الأدنى للقطر المطلوب وهو 8سم. يتم حساب قطر القطعة الأخيرة في الساق عن طريق تحليل الإنحدار بإستعمال طول الساق والقطر عند مستوى الصدر. يمكن حساب الحجم في هذا المثال عن طريق معادلة هيوبر.

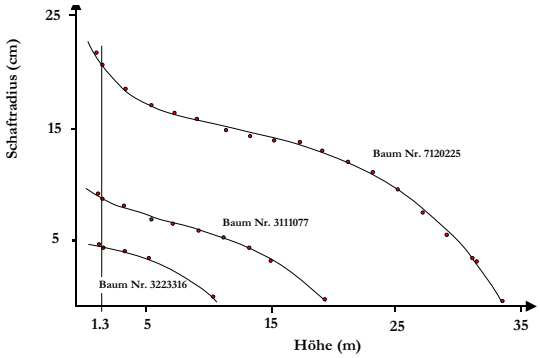
أثبتت أن إستعمال معامل الشكل وإنسياب الساق و معادلات الحجم يمكن أن تقود الى أخطاء كبيرة في التقديرات (إذا لم يؤخذ توسيع المدي الذي تغطيه في الإعتبار). يمكن التخلص كلياً من مثل هذه الأخطاء أو تقليلها عن طريق الإستعانة بمعادلة ساق بسيطة وإضافة قياس قطر وآحد فقط في الجزء الأدنى من الساق.
هنالك حاجة لثلاثة ثوابت كحد أدنى لتقديم نموذج رياضي دقيق يغطي كل سطح الساق، بما في ذلك الجزء الأسفل منه، الذي يكون عادة شديد التشوه.

معادلة برينك المعدلة:
تقرأ معادلة الساق (ثلاثية الثوابت) والتي إقترحها برينك وقادو (1986) وعدلها ريمر وآخرون (1995) كالاتي:

$$r(h) = u + v \cdot e^{-ph} - w \cdot e^{qh} \qquad (17.3)$$

حيث:
r(h) = نصف قطر الشجرة (سم) عند الإرتفاع (h) (بالمتر)
H = الإرتفاع الكلي للشجرة (بالمتر)
r_{13} = نصف قطر الشجرة عند مستوى إرتفاع الصدر (سم)
i = ثابت (نقطة مشتركة لبلوغ القمة)
P = ثابت (الجزء الأسفل من الساق)
q = ثابت (الجزء الأعلى من الساق)
كانت نتائج إستعمال هذه المعادلة جيدة جداً حيث إستعملت لعدة أنواع شجرية.

مثال تطبيقي:
إستفاد شتاينقاس (1995) من معلومات عن مجموعة مكونة من 2882 شجرة دوقلاس وتغطي هذه المعلومات الإرتفاع والقطر عند مستوى الصدر وثوابت معادلة الساق المستخدمة في معادلة برينك. في البحث تم إختيار ساق يمثل هذه المجموعة (Representative stem) ثم تم تحديد متوسط للثوابت الخمسة لمعادلة الساق. أجريت مقارنة بين منحنى الساق الوسط (الذي يمثل المجموعة) الذي تم حسابه عن طريق النموذج الرياضي وبين كل من منحنيات السيقان في المجموعة (2882). المعيار الذي إستخدم لمعرفة درجة التطابق هو الإختلافات في أشكال السيقان وكذلك في أحجامها. لتحديد هذا كمياً تم في البداية تقسيم محاور أطوال السيقان الى سنتمترات بمدى مقداره سنتمتراً واحداً. دآخل هذا المدى تم حساب حجم القطعة بإعتبارها اسطوانة. في النهاية تم حساب القيم الطلقة للفروقات بين كل حجمين متتاليين. في هذا المثال الذي أمامنا كانت المحصلة للقطعة رقم 3111077 أصغر ما يكون وبلغت 0.0058 متراً مكعباً. لوصف المجموعة استعملت ال 5% الأعلى والأدنى على اساس القطر عند مستوى الصدر. يجب أن تكون هذه ال5% أمثلة حقيقية للمجموعة كبيرة وصغيرة الحجم من الأشجار. تمتاز هذه الطريقة بأنها لا تمثل حالات خاصة. لا تعتبر السيقان الصغيرة جداً مناسبة نظراً لعددها القليل. القطعة رقم 3224416 تمثل 5% والقطعة رقم 7120255 تمثل 95%. الشكل (8.3) يوضح صلاحية معادلة برينك المعدلة للسيقان الثلاثة.



الشكل (8.3): تطبيق معادلة برينك المعدلة على ثلاثة سيقان أشجار من مجموعة تبلغ 2882 شجرة دوقلاس (المحور السيني= الإرتفاع بالأمتار، المحور الصادي= نصف قطر الساق).

للثوابت الثلاثة قدرة خاصة للتعبير عن الأجزاء المختلفة للساق. أمكن على أساس معلومات تحليل ساق لشجرة صنوبر *(Picea abies)* عمرها 94 سنة الحصول على علاقات بين الثوابت الثلاثة وإرتفاع الشجرة ونصف قطرها عند مستوى الصدر. بإستعمال معادلة برينك يمكن أيضاً وصف تطور شكل الساق مع تقدم العمر. الجدول (2.3) يوضح معلومات السيقان الثلاثة.

القطعة من الساق	القطر(سم)	الإرتفاع(م)	f	p	q	العمر
شجرة ممثلة No. 3111077	17.8	19.1	0.8307	0.3096	0.1281	46
الشجرةال-95% No. 7120225	41.4	33.5	0.7949	0.3259	0.1023	86
الشجرة ال-5% No. 3223316	9.2	10.2	0.9227	0.9999	0.1966	38

الجدول (2.3): قيم ثوابت المثال التطبيقي أعلاه

النماذج الرياضية الموحدة للساق

بما أن معادلة برينك تعمل على وصف شكل الساق على أساس ثوابت، فإنه توجد إمكانية لإيجاد علاقات بين ثوابت المعادلة والمعاملة الفلاحية للمشجر. صمم هوي وقادو على هذا الأساس منحنى موحد يعتمد على حساب الثوابت الثلاثة بمساعدة المعادلات (18.3– 20.3).

$$i = k_1 Dg^{k_2} \quad (18.3)$$

$$p = e^{k_7/Dg} \quad (19.3)$$

$$q = k_5 e^{k_6/Dg} H^{k_4} \quad (20.3)$$

حيث:

Dg = القطرالمحسوب من المساحة القاعدية للساق الوسطى بالمشجر (بالسنتمترات).

H = الإرتفاع السائد بالمشجر (بالأمتار).

k_1 = 0.4079، k_2 =1.037، k_4 =1.5012، k_5 =10.438، k_6 =1.4174، k_7 =1.7962

في بحوث أخرى عن شكل الساق للصنوبر *(Picea abies)* في أوكرانيا أثبتت المعادلة قدرتها على حساب الثابت (i) في معادلة برينك.

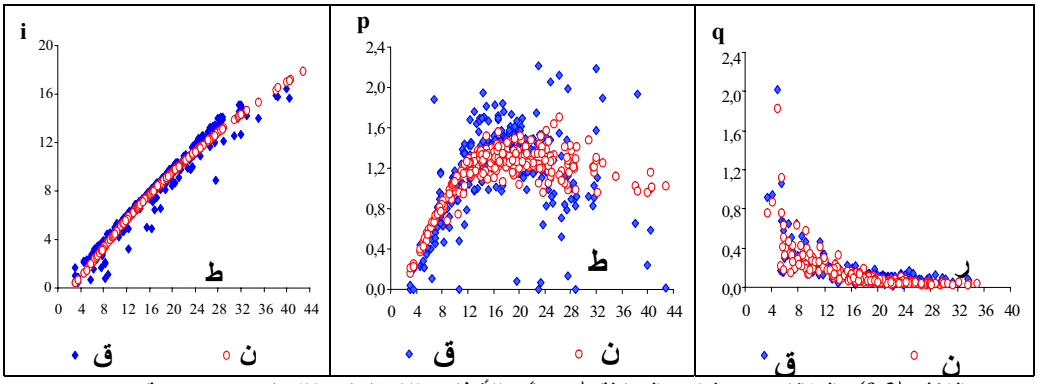
$$i = e^{\left(a_1 + a_2 * \ln(BHD) + \frac{a_3}{BHD} \right)} \qquad (21.3)$$

حيث:

BHD = القطر عند مستوى الصدر (سم)

a_1, a_2, a_3 = ثوابت (خاصة بالنوع الشجري)

ثبت أن هنالك إنحراف كبير جداً للثابت (p) الذي يصف تشوه أو إنتفاخ الجزء الأسفل من منحنى الساق، كما إتضح أنه ليست هنالك علاقة قوية بين هذا الثابت والصغات المختلفة للشجرة المفردة أو صفة المشجر بشكل عام. أما الثابت (q) الذي يعمل على وصف التشوه في الجزء الأعلى من الساق فقد ثبتت علاقة وآضحة بينه وبين إرتفاع الشجرة وكذلك القطر عند مستوى الصدر بالنسبة للأشجار المفردة (الشكل 9.3)



الشكل (9.3): العلاقات بين ثوابت المعادلة (i,p,q) والأقطار والإرتفاعات لأشجار مربوع عينة صنوبر (Picea abies) في أوكرانيا (ر= الإرتفاع، ن= نتائج النموذج، ق= نتائج القياس)

لتصميم معادلات لحساب ثوابت معادلة برنيك المعدلة بدقة، تمت دراسة كل العلاقات بين هذه الثوابت وخصائص الشجرة من ناحية، وخصائص المشجر من الناحية الأخرى. تم حساب الثوابت (p)، (q) لكل أشجار العينة من جديد، ولكن في هذه المرة بإعطاء قيم الثابت (i) حسب مانتج من النموذج الرياضي. أوضحت قيم (q) التي تم الحصول عليها بعد إعادة الحساب علاقة قوية مع القطر عند مستوى الصدر والإرتفاع بالنسبة للأشجار المفردة وكذلك بالنسبة للمساحة القاعدية للمشجر. اما إنحراف الثابت (p) مع القطر عند مستوى الصدر فوق 12سم، فلم ينقص إلا قليلاً (الشكل 9.3).

بأخذ هذه العناصر في الإعتبار، تم التوصل الى أنسب معادلة للثوابت وهي تقرأ كالاتي:

$$p = \frac{H * BHD}{a_4 * BHD^{\,2} + a_5 * \left(\frac{H}{BHD} \right)^2 + \frac{a_6}{H \cdot G}} \qquad (22.3)$$

$$q = a_7 * e^{\frac{a_8}{\ln(G)}} * (BHD * H)^{\frac{a_9}{BHD}} \qquad (23.3)$$

حيث:

H = إرتفاع الشجرة (بالمتر)

BHD = قطر الشجرة (بالسنتمتر)

G = المساحة القاعدية للمشجر (بالمتر في الهكتار)

$a_9...a_4$ = ثوابت المعادلة.

بتعويض المعدلات (21.3) و(22.3) و (23.3) اعلاه في المعادلة (4.3) يتم الحصول على النموذج الرياضي الموحد للساق. أمكن تحديد الثوابت الآتية لهذا النموذج الرياضي بمساعدة تحليل الإنحدار غير الخطي.

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
0,8566	0,5836	-6,9742	0,7038	29,2863	678,5058	0,0093	2,2657	4,9520

تعتبر المساحة القاعدية للمشجر قيمة مهمة، وهي من المعلومات التي تكون متاحة عقب كل عملية حصر. لقد ظهرت خصائص إحصائية مقنعة فيما يتعلق بالعلاقة بين المساحة القاعدية للمشجر والنموذج الرياضي الموحد للساق، إذ بلغت درجة دقة التقدير (R_2) قيمة 0.984 بالنسبة لعدد كلي مقداره 2441 عينة وبلغ متوسط مربع الخطأ (وهو الفرق بين القيم المحسوبة عن طريق النموذج الرياضي والقيم الحقيقية) 0.526سم. يتم حساب فاعلية النموذج الرياضي (Efficiency) وفقاً للمعادلة الآتية:

$$Efficiency = 1 - \frac{\sum_i \left(observed_i - \mathrm{mod}\,el\right)^2}{\sum_i \left(observed_i - \overline{averageobserved}\right)^2} \qquad (24.3)$$

(الفاعلية تعني هنا: الى أي حد يمكن للنموذج الرياضي أن يعطي معلومات أفضل من متوسطات القيم).

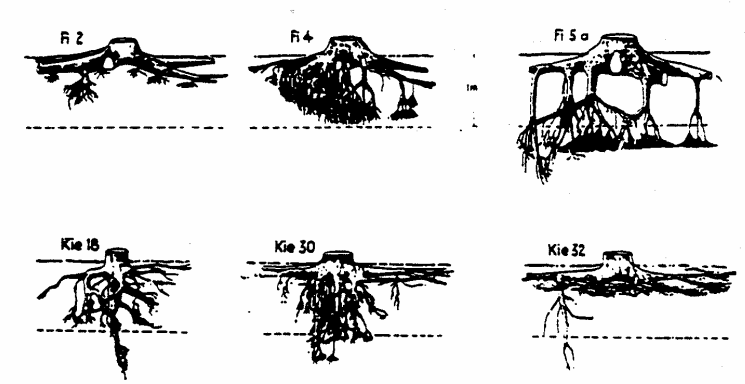
يمكن لفاعلية النموذج الرياضي أن تأخذ قيماً تقع في المدى − ∞ و 1 . إذا كانت الفاعلية= 1، فهذا يعني التطابق الكامل بين القيم التي تم حسابها عن طريق النموذج والقيم الحقيقية والقيمة 0 (صفر) تعني أن قيم النموذج لا تختلف عن متوسط القيم الحقيقية أما الفاعلية السالبة تعني ان قيم النموذج أسوأ من نظيراتها الناتجة من متوسط القيم، وهي تمثل خطأً منتظماً. بالقيمة التي وردت أعلاه (0.984) يمكن تقييم النموذج الرياضي بأنه فعال جداً.

3.3 . الجذور

تتلخص وظيفة جذور الشجرة في تثبيت الشجرة على الأرض وأخذ الماء والمواد الذائبة وتخزين المواد الإحتياطية. ترتبط قدرة الشجرة على الحياة بأخذ الماء والمواد الغذائية عن طريق الجذور والشعيرات الجذرية وكذلك إنسياب هذه المواد الى الساق ثم الى التاج. فيما يتعلق بأخذ المواد الغذائية تقوم المواد الميكورايزا بدور تكافلي بين الفطريات وجذور الشجرة، من الممكن تمييز الجذور بناءاً على أحجامها. إقترح ميتشرلش (1978) إعتبار الجذور التي يزيد قطرها عن 2ملم جذوراً كبيرة وتلك التي يتراوح نصف قطرها بين 0.5 و2ملم جذوراً رفيعة، أما التي يكون متوسط قطرها أقل من 0.5ملم فقد إعتبرها جذوراً رفيعة جداً.

من الممكن أيضاً التمييز بين مختلف أنواع الجذور وتحديد مميزات النظام الجذري على أساس إنتشارها في التربة. يمكن للجذور أن تخرج من الساق وتغوص مباشرة الى داخل التربة أو تنتشر أفقياً وقد تستمر أفقية أو تخرج منهاجذور أخرى تغوص أو ربما تنمو مائلة (تخترق التربة بزاوية).

بناءاً على شكل وإتجاه وتوزيع الجذور الكبيرة في التربة يمكن تقسيم الجذور حسب وصف كوستلر (1968) الى نظام جذري وتدي سطحي وثالث خليط بين الأثنين، وهذا الخليط بين النظامين يمكن أن يوجد بين مختلف الأنواع الشجرية وكذلك بين الأشجار من نفس النوع. الشكل (10.3) يوضح أمثلة لمختلف النظم الجذرية.



الشكل (10.3): التداخل في النظم الجذرية لنفس النوع الشجري (أخذت من كوستلر، 1978).

يتحدث شكل النظام الجذري وراثياً بشكل أساسي، غير أن هنالك عدة عوامل تؤثر في شكله أيضاً، مثل درجة صلابة التربة وشكل التربة ودرجة تعرية الصخور التحتية وحالة المياه تحت الأرض وتوزيع المواد الغذائية دآخل التربة. لهذا السبب فإننا لا نستطيع التحدث عن نوع معين للنظام الجذري لنوع شجري معين. بما أن الجذور تستطيع النمو في درجات الحرارة المنخفضة للتربة (جزئياً حتى الدرجة صفر مئوية)، فهي تختلف عن الساق في طريقة نموها. هنالك تفاوت كبير في نمو الجذور خلال العام.

تموت الجذور الرفيعة أثناء فترة النمو. وجد فوجل (1983) أن النسبة المئوية للجذور الرفيعة التي تموت تتراوح بين 30% و86%. لهذا السبب نجد أن الجذور الرفيعة تمثل جزءاً قليلاً من كتلة الجذور مقارنة بالجذور الكبيرة الممتدة. من ناحية أخرى فأن إسهام الجذور الرفيعة في الإنتاج السنوي للكتلة الحية أكبر من إسهام الجذور الكبيرة.

من الممكن أن يختلف توزيع الجذور الرفيعة والرفيعة جداً داخل التربة، من هنا تظهر أهمية هذا التوزيع في النماذج الرياضية لنمو الشجرة ونمو الجذور وبنائها الهندسي (أو المعماري). تمكن كيرن وآخرون (1961) من إثبات أن الجذور الرفيعة والرفيعة جداً توجد فقط في السنتمترات العشرة الأعلى من التربة وذلك من خلال بحوث تمت في الغابة السوداء بألمانيا، في تجارب أخرى وجد نفس هذين النوعين من الجذور بكثافة في العشرة سنتمترات التالية. من العناصر التي تؤثر سلباً على نمو الجذور (أيضاً) الإمتصاص في الترب الحمضية والتسمم بالألمونيوم، وهذان يؤثران بشكل كبير على بناء النبات لنظامه الجذري، خصوصاً الجذور الرفيعة. يؤثر تغيير تركيبة التربة أثناء حركة الجذور الرفيعة (خلالها) على قدرة هذه الجذور على أخذ الماء والمواد الغذائية، وبالتالي يؤثر ذلك على نموها. من منظور التأثير على إستقرار النظام الجذري يبدو أنه من المهم العمل على معرفة بناء وتطور الجذور وذلك لان نمو الشجرة وكل العمليات الفلاحية التي يمكن أن تتم دآخل الغابة تعتمد على معرفة نمو الجذور وتطورها.

أن تصميم نموذج رياضي مفصل لنمو جذور الأشجار المفردة لأمر بالغ الصعوبة، وذلك نظراً لضرورة معرفة التوزيع المائي والغذائي والعوائق التي تحد من حركة الجذور. البرنامج التالي يعتبر عملاً غير كامل لحساب نمو الجذور.

ان الشكل الهندسي للجذور لا تحدده نظم محددة كما ذكرنا من قبل، بل تحدده الظروف المحيطة. لذا يبدو أنه من المناسب تصميم نموذج رياضي لنمو الجذور على اساس أنها ظاهرة تطور في تربة أفتراضية بها توزيع مائي وغذائي معروفين.

يعتبر وصف تركيبة الجذور للأشجار الكبيرة، خصوصاً فيما يتعلق بتوزيع كتلة الجذور دآخل التربة، ذو أهمية خاصة. بالإضافة للإهتمام بكمية وتوزيع كتلة الجذور الرفيعة، والتي تشير الى أخذ المواد الغذائية والتأثيرات المتبادلة للأجزاء الدنيا من النبات وتركيبة المشجر، تجد أيضاً تركيبة الجذور الكبيرة أهتماماً زائداً نظراً لقدرتها التثبيتية، أي المساعدة على إستقرار الشجرة. يرتبط الحصول على معلومات عن النظام الجذري بتكاليف عالية لتغطية حفر الجذور وقياسها وتصميم الطرق المختلفة لوصف تركيبة الجذور. لكل هذه الصعوبات نجد أن البحوث الخاصة بوصف تركيبة الجذور قليلة جداً. مما يزيد الأمر صعوبة أيضاً القدرة التحويرية العالية جداً للجذور، إذ أنها تقوم بتغيير طريقتها إستجابة لاي مؤثرات بيئية.

من الطرق سهلة التنفيذ لتحديد بناء الجذور هي تقسيم أو تصنيف الجذور المعراة (أي بعد حفرها) الى مناطق محددة (Compartments).

يمكن مطابقة ثوابت الجذور التي يتم قياسها في كل منطقة مع موقعها الأصلي في منطقة الجذور. من الطبيعي هنا تقسيم النظام الجذري الى درجات عمق مختلفة ومسافات من محور الساق. يقسم النظام الجذري الى قطع متتالية تحسب أحجامها عن طريق قياس القطر الإبتدائي والقطر النهائي وطول كل قطعة. بهذه الطريقة يمكن حساب الكتلة الكلية للجذور وكذلك توزيعها في مختلف أعماق التربة ومختلف الإبعاد عن محو الساق.

يمكن الحصول على مؤشرات الطبيعة وسرعة نمو الجذور عن طريق توزيع الحجم (الكتلة) الى إتجاه أفقي وآخر رأسي. من هنا أيضاً يمكن تحديد الصفات الخاصة بكل نوع من أنواع الجذور. من الأهداف الأساسية للبحث في تركيبة الجذور التمكن من تصميم نماذج رياضية للكتلة الحية تحت الأرض وتوزيعها بناءاً على علاقات موجودة على ظاهر الأرض، كالقطر عند مستوى الصدر مثلاً. بهذه الطريقة يمكن أخذ مكونات التركيبة تحت الأرض في الإعتبار عند تصميم نماذج رياضية للنمو.

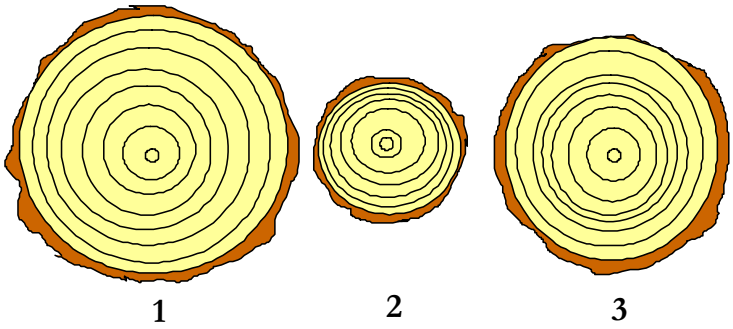
أن معرفة التركيبة وتصميم نماذج رياضية مقاربة للواقع فيما يتعلق بخصائص الموقع والتنافس والإستفادة من هذه النماذج لوضع تصور مستقبلئ يمكن أن يتحقق، عندما يكون من الممكن تحديد المؤشرات الإيكولوجية كمياً، وذلك فيما يتعلق بالتنظيم والإستغلال في الغابات ذات الأنواع الشجرية المتعددة. يسمح التوزيع المكاني للجذور الدقيقة (مثلاً) بلإعطاء معلومات عن أخذ الأشجار للمواد، في حين أن تركيبة الجذور الغليظة تحدد أحتمال وصول الشجرة الى الحجم الذي يراد الوصول إليه، فكلما زاد حجم الجذور الغليظة، كلما كانت الشجرة أكثر إستقراراً الأمر الذي يجعل من الممكن مواصلة الشجرة للنمو حتى عمر متأخر.

4. كثافة وتركيبة المشجر

يتم تقييم الغابة عبر كثافة وتركيبة المشجر. توضح الكثافة كمية الأشجار الموجودة دآخل المشجر، أما التركيبة فهي توضح شكل توزيع الأشجار دآخل المشجر. لا تؤثر كثافة وتركيبة المشجر في إحتمالات المعاملات الفلاحية فحسب، بل تؤثران أيضاً على الطريقة التي تنمو بها الأشجار. توضح كثافة المشجر الكثافة بالنسبة للمجموعة الشجرية الكلية، في حين أن كثافة النقطة تصف المحيط المباشر لشجرة معينة.

1.4. كثافة المشجر

الشكل (1.4) يوضح مثالاً لتأثير كثافة المشجر على نمو القطر بالنسبة لثلاث شجرات صنوبر (*Picea abies*) في عمر 9 سنوات، إخذت من مرابيع عينة بمنطقة ويزا بجنوب أفريقيا.



الشكل (1.4): ثلاثة قطاعات أفقية عند مستوى الصدر لثلاث شجرات صنوبر في عمر 9 سنوات، منطقة ويزا بجنوب أفريقيا (أخذت من كريب، 1939).

الشجرة رقم (1) تنمو في منطقة خالية (لاتوجد أشجار حولها)، الشجرة رقم (2) تنمو في مشجر ذي كثافة عالية أما الشجرة رقم (3) فإنها توضح زيادة ظاهرة في نمو القطر بعد عملية تخفيف (شلخ).
من المعايير التي تستخدم لقياس كثافة المشجر: المساحة القاعدية للمشجر ومؤشر كثافة المشجر والمسافات النسبية بين الأشجار ومعامل التنافس التاجي.

1.1.4. المساحة القاعدية للمشجر

تمثل المساحة القاعدية للأشجار (في المشجر) أكثر الطرق إستعمالاً لقياس الشجرة. يفترض دائماً أن القطاع العرضي لساق أي شجرة عبارة عن مساحة دائرة. بناءاً على ذلك يمكن حساب المساحة القاعدية لاي شجرة (g) قطرها (d_i) بالسنتمترات كالاتي.

$$g_i = \frac{\pi}{4} d_i^{\,2} \qquad (1.4)$$

وبالتالي يمكن حساب المساحة القاعدية للأشجار دآخل المشجر (G) (بالمتر المربع)، حيث أن عدد الأشجار = (n) بإستعمال المعادلة الآتية:

$$G = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^{n} d_i^{\,2} \qquad (2.4)$$

يمكن المقارنة بين المساحات القاعدية للأشجار بمختلف المشاجر، إذا كانت المساحات المتاحة لتلك المشاجر متطابقة. وبما أن هذه الحالة نادرة، فإننا نستخدم المساحة القاعدية في الهكتار كمعيار للمقارنة. يمكن تحقيق ذلك إذا قمنا بقسمة المساحة القاعدية بكل المشجر على مساحة المشجر بالهكتار.

مثال: في مشجر ما توجد 1000 شجرة في مساحة مقدارها 2 هكتار، قطر كل من هذه الأشجار يساوي 20سم. إذن المساحة القاعدية تساوي 1000×4000/3.14×(20^2) = 2/31.4 =15.7 متر مربع.
كلما زاد عدد الأشجار الكبيرة في المساحة، كلما كانت المساحة القاعدية للمشجر عالية. إذا ظل عدد الأشجار ثابتاً فأن المساحة القاعدية، بالتالي كثافة المشجر، ستزيد مع زيادة العمر ويحدث ذلك نتيجة لنمو الأشجار.

2.1.4. مؤشر كثافة المشجر

يعتبر مؤشر كثافة المشجر معياراً آخر لقياس كثافة المشجر. يحتاج إستمال هذا المعيار الى معرفة عدد الأشجار في الهكتار والقطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية (d_g) بالمشجر. لحساب مؤشر كثافة المشجر هنالك نموذج رياضي يحتوي على عدد الأشجار المتوقع مرتبطاً بالقطر االمحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية (المعادلة 3.4).

$$N = \beta_0 \cdot (d_g)^{-\beta_1} \qquad (3.4)$$

يمكن إستعمال المعادلة (3.4) لإيجاد العلاقة بين (d_g) والعدد الأقصى الممكن من الأشجار، شريطة أن تكون قيم β_0 و β_1 معروفتان.
إذا إفترضنا أن أقطار كل الأشجار بالمشجر متطابقة، فهذا يعني أن
d = di، i=1، ....، N وفي هذه الحالة تصبح المعادلة:

$$N \cdot (d)^{\beta_1} = \beta_0 \qquad (4.4)$$

إذا أفترضنا أن (β_1)= 2، فإن المساحة المطلوبة لكل شجرة تتناسب طردياً مع مساحتها القاعدية، وإذا إفترضنا أن (β_1) =1، فإن الماساحة المطلوبة يجب أن تتناسب طردياً مع قطر الشجرة.
نظرياً يمكن حساب عدد الأشجار من القطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية، وهذا أيضاً تحت شرط أن الثابتتين (β_0)و (β_1) معروفا القيم. يتم حساب المؤشر (النظري) لكثافة المشجر الذي يعطي عدد أشجار لقطر محسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية. 25سم مثلاً كالاتي:

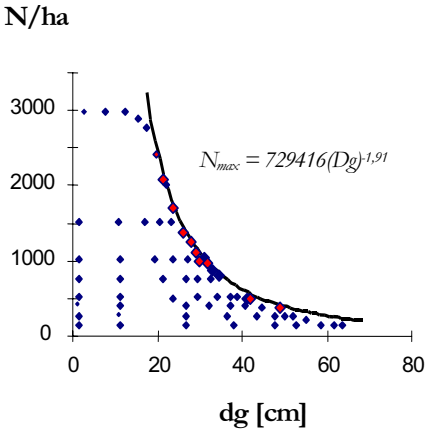
$$SDI = \beta_0 \cdot (25)^{-\beta_1} \qquad (5.4)$$

بدمج المعادلتين (3.4) و(5.4) نحصل على المعادلة (6.4) التي يمكن عن طريقها حساب مؤشر كثافة المشجر (SDI) من العدد الحقيقي للأشجار (N) والقطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية (d_g)

$$SDI = N \cdot \left(\frac{25}{d_g} \right)^{-\beta_1} \qquad (6.4)$$

من مؤشر كثافة المشجر يمكن معرفة الكثافة الشجرية.

تستعمل العلاقة الموجودة في المعادلة للتعبير عن الكثافة الممكنة للمشجر التي تتم عن طريقها معرفة العدد الأقصى الممكن من الأشجار الحية التي يمكن أن توجد قطر معين. هنالك إمكانية لإيجاد العلاقة بين عدد الأشجار (N) والقطر (d_g) وذلك بعرض عدد كبير من مساحات العينة (عدد الأشجار مع القطر المطابق) بيانياً تم البحث عن أنسب الثوابت للمعادلة (الشكل 4.4). بمساعدة هذا النموذج الرياضي يمكن التأكد مما إذا كانت الكثافة الموجودة حرجة أم لا، أو ما إذا كانت الكثافة المحتملة للمشجر قد تم تخطيطها أم لا.



الشكل (4.4): العلاقة الحدية بين القطر وعدد الأشجار لثمانية مرابيع عينة بها أعداد مختلفة من أشجار النوع (Pinus radiata) في منطقة توكاي بجنوب أفريقيا (SPHA) = عدد الأشجار في الهكتار، (D)= القطر.

لقد تمت محاولات كثيرة لتفسير النظم الموجودة في الغابات بنماذج رياضية بسيطة تسهيلاً لحساب مؤشر كثافة المشجر.

أمثلة:

الثوابت (β_0)= 100000 و(β_1)= 1.5 يصفان العلاقة بين (d_g) والعدد الأقصى الممكن لعدد الأشجار (N) على حسب المعادلة (5.4).

أ. بإفتراض أن مؤشر الكثافة للمشجر (نظرياً) هو SDI= 100000× (25)$^{-1.5}$= 800

بما أن القطر في المشجر= 25سم ، فأن العدد الأقصى الممكن من الأشجار= 800 شجرة.

ب. يبلغ عدد الأشجار في مشجر 1000 شجرة، القطر 12سم.

SDI=1000 (12/25)$^{-1.5}$ = 332.6 وهذا العدد من 800 بكثير، مما يعني أن الكثافة الحقيقية للمشجر مقارنة بالعدد الأقصى (الممكن) تعتبر قليلة جداً.

ج. كم عدد الأشجار التي يمكن أن تستمر في البقاء عندما يصل القطر 12سم؟

N= 100000×(12)$^{-1.5}$ = 2406 شجرة.

3.1.4. المسافات النسبية بين الأشجار

من الطرق السهلة لقياس الكثافة الشجرية ما يعرف بالمسافات النسبية بين الأشجار (Relative spacing) ويرمز لها بـــ (RS) وتحسب عن طريق عدد الأشجار في الهكتار (N) والإرتفاع السائد للمشجر (H_0) المعادلة (7.4).

$$RS = \frac{\sqrt{\frac{10000}{N}}}{H_o} \qquad (4.7)$$

بزيادة عدد الأشجار مع ثبات الإرتفاع السا تزيد كثافة المشجر وتقل قيمة (RS). البسط في المعادلة أعلاه هو عبارة عن قيمة متوسط المسافات بين الأشجار المتجاورة.

مثال:

في مشجر مختلط متوسط المسافات بين الأشجار قبل عملية التخفيف (الشلخ) 3 أمتار (1111شجرة في الهكتار) وصار 4 أمتار بعد عملية التخفيف (625 شجرة في الهكتار) بارتفاع سائد (H_0) يساوي 20 متراً. إذن قلت الكثافة الشجرية بعد التخفيف وزادت قيمة (RS) من 3/20= (15%) الى 4/20= (20%).

4.1.4. معامل التنافس التاجي

يصف معامل التنافس التاجي بالنسبة (العلاقة) بين مجموع مساحة تيجان الأشجار بالمشجر ومساحة المشجر. كلما زاد مجموع مساحة التيجان، كلما كان المشجر ذو كثافة شجرية عالية. لاستنباط مساحة غطاء تاجي تخيلية علينا أولاً إيجاد علاقة بين القطر عند مستوي الصدر (D_i) بالسنتمترات وقطر التاج (CD_i) بالأمتار لشجرة (واحدة) تنمو بشكل منفرد (المعادلة 8.4)

$$CD_i = \alpha_0 + \alpha_1 D_i \qquad (8.4)$$

يتم حساب الثوابت (α_0) و(α_1) عن طريق الأشجار المفردة. يمكن حساب مساحة التغطية التاجية لشجرة مفردة (CS_i) بالمتر المربع عن طريق المعادلة (9.4).

$$CS_i = \pi\left(\frac{CDi}{2}\right)^2 = \frac{\pi}{4}(\alpha_0 + \alpha_1 D_i)^2 \qquad (9.4)$$

إذن مجموع مساحات الغطاء التاجي لا تحسب (ببساطة) كمجموع لمساحات الغطاء التاجي الحقيقية، بل كمجموع لمساحات الغطاء التاجي المحسوبة لأشجار مفردة 0 يتم حساب معامل التنافس التاجي كالآتي:

$$CCF = \frac{1}{F}\left(\sum_{i=1}^{n} CS_i\right) \qquad (10.4)$$

حيث:

F= مساحة المشجر بالمتر المربع.

عندما تكون قيمة (CCF)= 1 مثلاً فهذا يعني أن أقطار الأشجار عند مستوى الصدر في المشجر موزعة بحيث أن الغطاء التاجي المتوقع يغطي مساحة المشجر تماماً (في ظروف نمو مثلى، كما في حالة الأشجار المفردة). عندما يكون (CCF) أقل من 1، يفترض الا تكون منافسة، أي أن مجموع مساحات الغطاء التاجي التي تكون موجودة في ظروف نمو مثالية أقل من مساحة المشجر. عندما تكون (CCF) أكبر من 1، فإن الأشجار تحت ضغط تنافسي.

2.4. التغطية التاجية

في حين أن كل المعايير التي سبق ذكرها تستعمل لحساب كثافة المشجر على أساس المجموعة الشجرية داخله، فإن التغطية التاجية تحسب على أساس الحالة التنافسية للأشجار المفردة، مع عدم معرفة مكان هذه الأشجار. يمكن حساب التغطية عن طريق الجزء المئوي للمساحة القاعدية وايضاً عن طريق ما يعرف بالمؤشر C66 ومؤشر GD.

1.2.4. الجزء المئوي للمساحة القاعدية (المساحة القاعدية للأشجار الأكبر)

يعتبر الجزء المئوي للمساحة القاعدية (Basal area percentile) مقياس للوضع الإجتماعي للشجرة داخل توزيعات المساحات القاعدية للمشجر. لحساب الجزء المئوي للمساحة القاعدية يجب أولاً الحصول على المساحات القاعدية للأشجار. تحسب المساحة القاعدية للشجرة الواحدة (gi) عن طريق قطرها (di).

$$g_i = \frac{\pi}{4} d_i^{\,2} \qquad (11.4)$$

من المساحات القاعدية للأشجار داخل المشجر يمكن حساب المساحة القاعدية بالمشجر (G)

$$G=\frac{\pi}{4}\sum_{i=1}^{n}d_i^{\,2} \qquad (12.4)$$

الجزء المئوية من المساحة القاعدية (P_i) الذي تمثله الشجرة (i) يساوي الجزء من المساحة الكلية الذي تحتله الأشجار المكونة للمساحة القاعدية، والتي يمكن أن تكون أقل أو مساوية للمساحة القاعدية.

$$p_i=\frac{1}{G}\sum_{\substack{j=1\\ g_j\le g_i}}^{n}g_i \qquad (13.4)$$

مثال: في الجدول أدناه 10 شجرات في مشجر، وضعت كل شجرة مع القطر والمساحة القاعدية المطابقة لها:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_i [cm]	20	21	23	27	31	32	33	37	37	41
g_i [m^2]	0.031	0.033	0.042	0.057	0.075	0.080	0.086	0.108	0.108	0.132

تبلغ المساحة القاعدية للأشجار العشرة 0.752 متراً مربعاً
الجزء المئوي الذي تمثله الأشجار حتى الشجرة 4 يمكن حسابه كالآتي:

$$p_4=(0.031+0.033+0.042+0.057)/0.752=0.163/0.752=21.7\%$$

أي أن 21.7% من المساحة القاعدية تمثله أشجار لها مساحات قاعدية تقل عن أو تساوي 0.057% (أي المساحة القاعدية للشجرة 4).
يوضح الجزء المئوي من المساحة القاعدية فقط عن الترتيب الإجتماعي للشجرة المحددة، لكنه لايعطي إعتباراً لكثافة المشجر. في بعض الأحيان تستخدم المساحة القاعدية للأشجار الأكبر (Basal Area Larger) وتكتب إختصاراً (BAL) كمقياس للتغطية التاجية. يمكن إستنباط الجزء المئوي للمساحة القاعدية من المساحة القاعدية التراكمية كالآتي.

$$p_j=1-\left(\frac{GG_{ij}}{G_i}\right)$$
$$,GG_{ij}=G_i\cdot(1-p_j)$$

حيث:
(Ggij) يساوي حاصل جمع المساحات القاعدية لكل الأشجار التي تزيد أقطارها (عند مستوى الصدر) عن قطر الشجرة المرجعية (j) بالمتر المربع، (Gi) المساحة القاعدية الكلية بالمشجر(i) بالمتر المربع.
إذن المساحة القاعدية الأكبر لا تأخذ في الإعتبار رتبة الشجرة المرجعية فحسب، بل كثافة المشجر ايضاً . من المثال:

$GG_4 = 0.752.\ (1- 0.217) = 0.589m^2$

2.2.4. مؤشر بالمواد (BALMODINDEX)

في المشاجر متساوية العمر والتي تتكون من نوع شجري واحد يمكن إستخدام مؤشر التنافس (بالمواد) الذي إقترحه قادو وشرودر (1999).

$$RS_i=\frac{\sqrt{10000/N_i}}{H_i}\quad \text{و}\quad p_j=1-\frac{GG_{ij}}{G_i}\quad \text{و}\quad Bal\,\mathrm{mod}_{ij}=\frac{(1-p_j)}{RS_i} \qquad (14.4)$$

الرموز كما وردت في الفقرتين 3.1.4 و1.2.4.

مثال: في الجدول التالي معلومات عن 15 شجرة من مربوع عينة في مشجر من أشجار ***Quercus spp.***

الشجرة (j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
d_j (cm)	2,0	3,0	3,0	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	5,0	5,0	5,5	6,5	7,0	8,0	8,5
h_j (m)	3,7	3,4	3,7	6,2	4,6	5,7	6,1	6,3	6,6	7,2	7,1	8,4	9,1	8,6	10,5
g_j (cm^2)	3,14	7,1	7,1	9,6	12,6	12,6	12,6	12,6	19,7	19,7	23,8	33,2	38,5	50,4	56,8
GG_{ij}	316	302	302	293	242	242	242	242	203	203	179	146	107	57	0
G_i (cm^2)	319,48														
P_j	0,01	0,05	0,05	0,08	0,24	0,24	0,24	0,24	0,36	0,36	0,44	0,54	0,66	0,82	1
N_i	23810														
H_i	9,4														
Rs_i	0,0689														
$Balmod_{ij}$	14,4	13,8	13,8	13,4	11,0	11,0	11,0	11,0	9,3	9,3	8,1	6,7	4,9	2,6	0

للشجرة(1) التي قطرها 2سم وإرتفاعها 3.7متر نحصل على جزء مئوي من المساحة القاعدية.

$$p_1 = 1 - \frac{7{,}1 + 7{,}1 + 9{,}6 + 12{,}6 + 12{,}6 + 12{,}6 + 12{,}6 + 19{,}7 + 19{,}7 + 23{,}8 + 33{,}24 + 38{,}5 + 51{,}4 + 56{,}8}{319{,}48} = 0{,}01$$

يتم حساب متوسط إرتفاع أطول 3 شجرات في مربوع العينة كالآتي.

$$H_1 = \frac{10{,}5 + 9{,}1 + 8{,}6}{3} = 9{,}4$$

يبلغ عدد الأشجار في مربوع العينة 23810 شجرة في الهكتار. من هنا نحصل على

$$RS_1 = \frac{\sqrt{10000/23810}}{9{,}4} = 0{,}0689$$

بهذه المعلومات وإستعمال مؤشر بالمواد للشجرة 1 نحصل على:

$$Balmod_1 = \frac{1 - 0{,}01}{0{,}0689} = 14{,}36865 \approx 14{,}4$$

3.2.4. مؤشر C66

يستعمل هذا المؤشر كمقياس لكيفية ترتيب شجرة محدد في المشجر بناءاً على مساحة التغطية التاجية لهذه الشجرة مع وضع إرتفاع التاج والتغطية التاجية لكل أشجار المشجر في الإعتبار. لحساب مؤشر C66 لشجرة واحدة يجب الحصول على إرتفاعها الكلي ونقطة بداية التاج (من أسفل). يستعمل الفرق بين هذين (أي طول التاج) لتحديد نقطة بداية الحساب. هذه تساوي 66% من إرتفاع التاج (محسوبة من قمة الشجرة الى أسفل)، ومن هنا جاءت التسمية للحصول على هذا المؤشر يتم حساب مساحة التغطية التاجية لكل الأشجار. بشكل عام هنالك 3 حالات:

أ. أن يقع إرتفاع نقطة بداية التاج للشجرة المنافسة فوق الإرتفاع المحسوب أعلاه للشجرة المرجعية. في هذه الحالة تؤخذ مساحة التغطية التاجية للشجرة المنافسة كاملة.

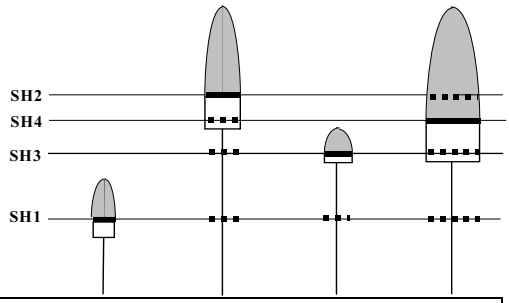
ب. أن يقع إرتفاع الشجرة المنافسة تحت إرتفاع القطعة، في هذه الحالة لا تؤخذ الشجرة المنافسة في الحسبان.

ج. فيما عدا ذلك تؤخذ التغطية التاجية للأشجار المنافسة عند نقطة التنافس للشجرة المرجعية في الإعتبار.

يمكن الحصول على مؤشر C66 لشجرة مختارة (i) في مساحة مقدارها 1000 متر مربع بإستعمال المعادلة (14.4):

$$C66_i = \sum_j KS66_j / 10000 \qquad (14.4)$$

مثال: في مشجر صنوبر (*Picea abies*): في مساحة مقدارها 30 متراً مربعاً توجد 4 شجرات كما في الشكل (1.4) بإرتفاعات كلية وإرتفاعات تيجان مختلفة.



رقم الشجرة	*1*	*2*	*3*	*4*
القطر عند مستوى الصدر (بالسم)	10	25	15	30
الإرتفاع (بالمتر)	12	24	15	24
نقطة بداية التاج إبتداءاً من سطح الأرض(بالمتر)	6	15	12	12
طول التاج(بالمتر)	6	9	3	12
إرتفاع أعرض جزء فى التاج عن سطح الأرض (بالمتر)	8	18	13	16
نصف قطر التاج (بالمتر)	0.95	1.8	1.25	2.05
المساحة الخارجية للتاج (بالمتر المربع)	24.1	68.8	16.6	104.1

الشكل (4.1): مشجر صنوبر (*Picea abies*) إفتراضي به 4 شجرات في مساحة 30 متر مربع.

يساوي مؤشر C66 حاصل جمع مربعات أنصاف أقطار التيجان عند النقطة الأعرض في تاج الشجرة المرجعية مضروباً في (π) مقسوماً على مساحة المشجر. للشجرات الأربعة في المثال نحصل على القيم الآتية للمؤشر C66:

الشجرة	C66
1	$\frac{\pi}{30}\left(0.95^2+1.8^2+1.25^2+2.05^2\right)=1.04$
2	$\frac{\pi}{30}\left(0+1.8^2+0+1.77^2\right)=0.67$
3	$\frac{\pi}{30}\left(0+1.8^2+1.25^2+2.05^2\right)=0.94$
4	$\frac{\pi}{30}\left(0+1.8^2+0+2.05^2\right)=0.78$

4.2.4 مؤشر المساحة القاعدية– القطر

يعتبر مؤشر المساحة القاعدية– القطر من أسهل الطرق لوصف حالة التنافس بالنسبة للشجرة الواحدة الموجودة في اي مكان (غير معلومة المكان)، ويرمز لها بـــ (GD). يأخذ مؤشر (GD) في الإعتبار بالنسبة بين المساحة القاعدية (Gj) لاشجار مشجر (j) والمساحة القاعدية القصوى الممكنة للمشجر (Gmax) والنسبة بين القطر عند مستوى الصدر (di) للشجرة المرجعية (i) ومتوسط عند مستوى الصدر (dj) للمشجر (j). يمكن المؤشر للشجرة المرجعية (i) التي قطرها (di) عن طريق المعادلة (15.4):

$$GD_i = \left(\frac{G_j}{G_{max}} \right)^{(d_i/\bar{d}_j)} \qquad (15.4)$$

هنا يجب أن يؤخذ الوضع النسبي للشجرة (i) في المشجر (j) وكذلك كثافة المشجر في الإعتبار. كلما قل قطر الشجرة المرجعية مع ثبات المساحة القاعدية ومتوسط القطر، كلما قلت قيمة المؤشر (GD). تزيد قيمة المؤشر (GD) مع نقصان مساحة المشجر وزيادة قطر الشجرة المرجعية.

3.4. الكثافة الشجرية في نقطة محددة

بمعرفة إحداثيات الأشجار داخل المشجر تتوفر طرق كثيرة متنوعة لوصف كثافته. من هذه الطرق يمكن وصف الكثافة في نقاط محددة (جداً) داخل المشجر. لحساب الكثافة في نقطة معينة يمكن إستعمال ما يعرف بمؤشر التنافس (Competition index). يمكن تقسيم الطرق العديدة المستعملة لتحديد حالة التنافس الى ثلاثة مجموعات. ينتج الضغط التنافسي لاي شجرة مرجعية (i) عبر:

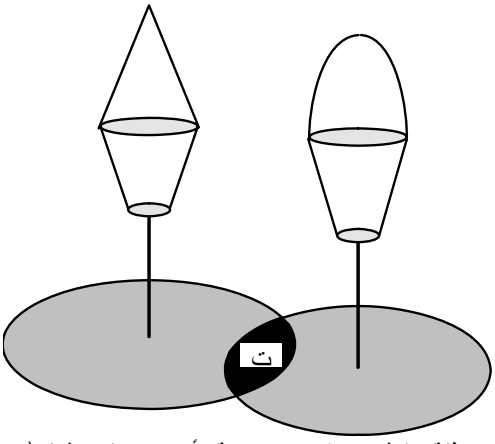
1. مساحة التداخل (التعدي).
2. نسبة الحجم المقرونة بالمسافات البينية.
3. المساحة المتاحة للنمو.

في هذا الجزء ستتم مناقشة مساحة التداخل أو التعدي ونسبة القطر المقرونة بالمسافات البينية.

1.3.4. مساحة التداخل (التعدي)

طور قيرارد (1969) مؤشراً للمنافسة تؤخذ فيه المسافات بين الشجرة المرجعية والأشجار المجاورة لها مباشرة. تعتبر الأشجار المجاورة للشجرة المرجعية (i) والموجودة داخل منطقة التنافس أشجار منافسة لها وتعتبر الشجرة المرجعية هي المركز في دائرة هذه الأشجار المنافسة. يعتبر نصف قطر هذه الدائرة (ri) ذو علاقة بالقطر عند مستوى الصدر. إنطلاقاً من الإمتداد الحقيقي لتيجان الأشجار المنافسة يتم حساب الإمتداد المحتمل لها ولتسهيل الأمر يفترض أن يحتل تاج الشجرة المرجعية نصف مساحة الدائرة التي توجد بها الأشجار المنافسة.

لكل شجرة منافسة يؤخذ في الإعتبار الجزء من مساحة الدائرة الموجودة في منطقة التنافس (التأثير). في حالات خاصة (جداً) يمكن أن تؤخذ كل الدائرة في الإعتبار. ويعرف الجزء من مساحة دائرة الأشجار المتنافسة (j) في منطقة تنافس الشجرة المرجعية (i) بمسافة التداخل (الشكل 4.4).

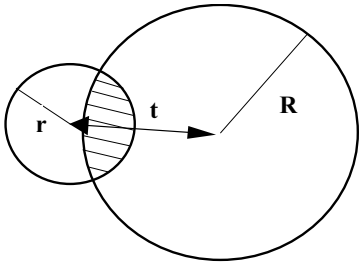


الشكل (4.4): منطقة تداخل بين شجرة مرجعية وأخرى مجاورة لها (ت= منطقة تداخل)

يحسب مؤشر التنافس على طريقة قيرهارد عن طريق النسبة بين مجموعات التداخل ومساحة التنافس أو التأثير (i) المعادلة (16.4).

$$CI_i = \frac{1}{\pi \cdot r_i^{\,2}} \sum_{j=1}^{m} \ddot{U}F_{ij} \qquad (16.4)$$

يمكن حساب مساحة تداخل منطقي تداخل منطقتي تنافس (تأثير) نصفي قطريهما (r) و(R) ومتوسط المسافة بين الأشجار (t) (الشكل 5.4) عن طريق المعادلة (17.4):



الشكل (5.4): منطقة تداخل بين مساحتي تنافس بمساحات مخلفة.

$$Area(t,r,R) = r^2 \left\{ \arccos\left(\frac{t^2 + r^2 - R^2}{2tr} \right) \right\} + R^2 \left\{ \arccos\left(\frac{t^2 + R^2 - r^2}{2tR} \right) \right\} - ty \qquad (17.4)$$

where $x_1 = \dfrac{t^2 + r^2 - R^2}{2 \cdot t}$ And $y = \sqrt{r^2 - x_1^{\,2}}$

كلما ذاد عدد الأشجار ذات التيجان القابلة للإمتداد في المنطقة المجاورة للشجرة المرجعية، كلما زادت قيمة مؤشر التنافس. إذاً تتقاطع مناطق التأثير المتجاورة مع منطقة التأثير (i)، حيث توجد الشجرة المرجعية، فإن مؤشر التنافس يأخذ القيمة صفر. من الصعوبات التي تواجه هذه الطريقة عدم وجود نظام صالح بيولوجيا لتحديد حجم مناطق التنافس.

2.3.4. النسبة الرابطة بين الأقطار والمسافات البينية

يعتمد الضغط التنافسي (على أي شجرة) على أبعاد (أحجام) الأشجار المجاورة لها والمسافات البينية. في هذه الطريقة يتم جمع الأقطار عند مستوى الصدر (و أي أبعاد أخرى) للشجرة المنافسة (j) وللشجرة المرجعية (i) ثم تقرن (توزن) هذه المقادير بالمسافات بين الشجرة المنافسة والشجرة المرجعية. تعتمد هذه الطريقة على معادلة هيقي (1974):

$$HgCI_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{d_j}{d_i} \frac{1}{Abst_{ij}} \qquad (18.4)$$

حيث:

$HgCI_i$ = مؤشر هيقي: مؤشر التنافس للشجرة المرجعية.

d_j = القطر عند مستوى الصدر للشجرة المنافسة (j) بالسنتمترات

d_i = القطر عند مستوى الصدر للشجرة المرجعية (i) بالسنتمترات

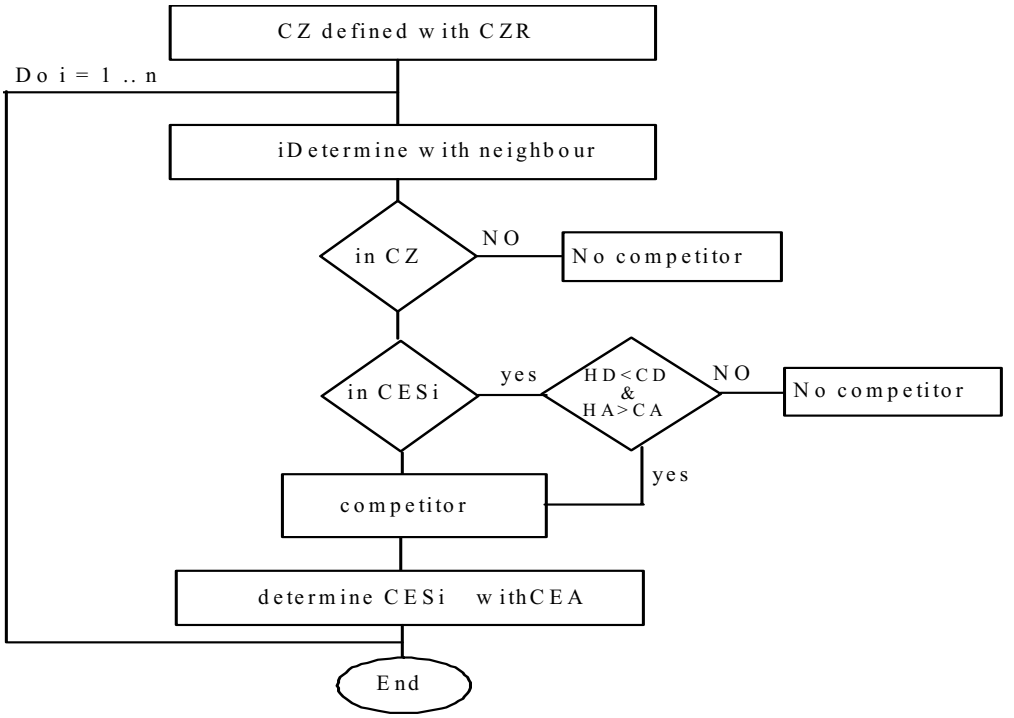
$Abst_{ij}$ = المسافة بين الشجرة المرجعية والشجرة المنافسة لها

n = عدد الأشجار المنافسة.

إن مؤشر هيقي ليس فقط صحيحاً من الناحية النظرية، وإنما يمتاز أيضاً بأن المعلومات التي يحتاجها قليلة جداً مقارنة بالمؤشرات الأخرى. هنالك دائماً سؤال يتبادر الى الذهن عند تطبيق هذه الطريقة: أي الأشجار المجاورة يمكن إعتبارها أشجاراً منافسة؟ حدد هيقي مساحة ثابتة حول الشجرة المرجعية نصف قطرها 10 أقدام. كل الأشجار دآخل هذه الدائرة تعتبر منافسة.هنالك مشكلة في تطبيق مؤشر هيقي على الغابات النقية (المكونة من نوع شجري واحد) ومتساوية العمر، وهي أن قيمة المؤشر تنقص بزيادة العمر. يزيد متوسط المسافات بين الأشجار، وبهذا ينقص تلقائياً عدد الأشجار المنافسة التي تم تحديدها في السابق في المساحة الثابتة للدائرة.

من الطرق التي تستخدم كثيراً لتحديد الأشجار المنافسة طريقة الزاوية الحدودية. في هذه الطريقة يبدأ العمل دائماً إبتداءاً من الشجرة المرجعية ويستخدم منشور الزوايا بفتحة محددة. كل الأشجار المجاورة للشجرة المرجعية التي تكون أقطارها (عند مستوى الصدر) أكبر من فتحة الزاوية، تعتبر أشجار منافسة. من محاسن هذه الطريقة أنه يمكن تجاوز المساحة الثابتة للدائرة، ولكنها من الناحية الأخرى لا تستطيع تحديد الأشجار المنافسة التي لايمكن رؤيتها نظراً لوقوعها خلف الأشجار القريبة من الشجرة المرجعية (محجوبة عن الرؤية). في بعض الأحيان قد توجد أيضاً أشجار صغيرة (تعتبر نظراً لصغر أحجامها) وهذه لا تؤخذ في الإعتبار رغم تأثيرها، تحديد الأشجار المنافسة على الأشجار النشطة (كبيرة الحجم).

طور لي وقادو (1997) طريقة تحديد الأشجار المنافسة، وتبحث الطريقة بشكل مستمر عن الأشجار المنافسة النشطة في منطقة تنافس محددة. تؤخذ الأشجار المجاورة للشجرة المرجعية الواحدة تلو الأخري لمعرفة ما إذا كانت الشجرة المنافسة نشطة أم لا (الشكل 6.4). الشجرة المنافسة وهى (فقط) الشجرة التالية للشجرة المرجعية دآخل منطقة تنافس محددة.



الشكل (6.4): يوضح تحديد الأشجار المنافسة (CZ = منطقة التنافس، CZR =نصف قطر منطقة التنافس، CES = جزء إستبعاد المنافسة، CEA =زاوية إستبعاد المنافسة، HA = الزاوية الأفقية، HD =المسافة الأفقية، CA =الزاوية الحرجة، CD = المساحة الحرجة).

تحدد منطقة التنافس (CZ) لكل شجرة مرجعية كدائرة نصف قطرها (CZR) والذي يكون تحديده قد تم مسبقاً ويحسب كالاتي:

$$CZR = k \cdot \sqrt{\frac{10000}{N}} \qquad (19.4)$$

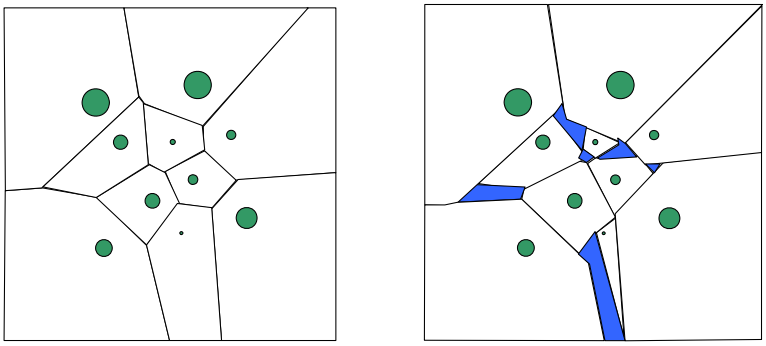
حيث: (k)= ثابت، (N)= عدد الأشجار في الهكتار.

في البداية تصلح كل الأشجار داخل منطقة التنافس كأشجار يمكنها منافسة الشجرة المرجعية. إذا كانت الأشجار التي يمكنها التنافس (داخل منطقة المنافسة) يغطي بعضها بعضاً، تعتبر الشجرة الأقرب للشجرة المرجعية هي الشجرة المنافسة. إذن هنالك شجرة لها القدرة على المنافسة (هي داخل منطقة التنافس) ولكنها بعيدة عن الشجرة المرجعية، مثل هذه تحسب داخل منطقة التنافس.
يقل عدد الاشجار المنافسة، كلما كبرت زاوية إستبعاد المنافسة (CEA). مع نقصان عدد الأشجار المنافسة النشطة، تقل أيضاً قيمة مؤشر هيقي. عندما يقل (CEA) تزيد قيمة مؤشر هيقي، ويقل عدد الأشجار النشطة في التنافس (كما هو متوقع) مع زيادة (CEA)، وذلك نظراً للزيادة في (CES) أي جزء إستبعاد المنافسة. يتناقص هذا الأثر مع زيادة (CEA).
يختفي التأثير عندما تساوي قيمة (k) 1 (أنظر المعادلة 19.4). في هذه الحالة فإن نصف قطر منطقة التنافس يساوي متوسط المنافسة التي تحتاجها الشجرة، وبالتالي ليس هنالك منافسة. لتحديد الأشجار المنافسة إذن يجب أن يكون نصف قطر منطقة التنافس مساوياً لمتوسط المسافة التي تحتاجها الشجرة على أقل تقدير.

أثبت مؤشر هيقي سهولته وصلاحيته بيولوجياً بالإضافة الى أنه يحتاج الى جهد يسير للحصول على المعلومات اللازمة لتطبيقه مقارنة ببقية المؤشرات. المأخذ على مؤشر هيقي هو أن تحديد الأشجار المنافسة غير معرف بشكل واضح. الطريقة التي تم وصفها أعلاه تختلف عن كل الطرق التي كانت تستخدم (حتى الآن) في تحديدها للأشجار النشطة في المنافسة. وذلك بأنها تهتم بالأشجار الموجودة داخل منطقة التنافس بإعتبارها جارات مباشرة للشجرة المرجعية. يتم تحديد الأشجار النشطة في التنافس خطوة تلو الأخرى. تمتاز الطريقة التي طورها لي وقادو بقوة مؤشر هيقي وتتخلص في نفس الوقت من العيب الأساسي فيها.

2.2.4المساحات الطبغرافية والإيكولوجية للشجرة

المقصود بالمساحة الطبغرافية والإيكولوجية للشجرة هو المستوى الأفقي (أو المكان) الذي توجد فيه الشجرة. تحدث كثيرون من علماء الغابات عن الأشكال الهندسية للمساحات المتاحة لكل شجرة، فقد إستعملت عبارات مثل: المساحة المتاحة للشجرة، والمساحة التي يمكن إتاحتها للشجرة وغير ذلك. تحدد المساحة الطبغرافية للشجرة بتصنيف المسافة بين الشجرة المرجعية والأشجار المجاورة لها. تتبع للمساحة الطبغرافية للشجرة كل النقاط في مساحة المشجر التي تقع أقرب للنقطة التي تنمو فيها شجرة مقارنة بالأشجار الأخرى المجاورة. تحدد المساحة الطبغرافية للشجرة عن طريق خطوط غير مستقيمة، تقسم المساحة المتاحة في المشجر الى مساحات طبغرافية لكل شجرة دون أن يكون هنالك أي فراغ، كما أنه لا يوضع أي إعتبار لاحجام الأشجار (الشكل 7.4).



الشكل (7.4): المساحات الطبغرافية والإيكولوجية لعشر شجرات بأحجام مختلفة.

بإعطاء أوزان للمسافات بين الأشجار المتجاورة بمساعدة عناصر مختارة من عناصر نمو الأشجار (أو أجزاء منها، مثل الأقطار أو أحجام التيجان الخ.) وإعطاء كل شجرة المساحة المتوازنة مع هذه العناصر، تنشأ نماذج إيكولوجية للمساحة بالنسبة لكل شجرة. في هذه الحالة فإن حدود المساحة لكل شجرة يمكن توضيحها بخطوط غير مستقيمة، و لكن توجد فراغات في هذا التقسيم. يتم حديد المساحة للشجرة بعدة طرق، فقد إستعمل بيلو (1977) ومارتن (1986) تحديد المساحة لكل شجرة في مسائل تتعلق بالبيئة، أما ماسومورا (1988) وروميش (1995) وهازينمولر (2002) فقد إستعملوا النماذج الرياضية للمساحة الخاصة بكل شجرة بغرض حساب الزيادة التي تحدث في الأشجار في حين أن شتاوبندا (1977) قد استعمله في عملية حصر للتجدد الطبيعي.

4.4 . التركيبة البسيطة: التكرارت التوزيعية لصفات الأشجار

لا يتم تصنيف المشاجر الغابية عبر الكثافة لوحدها، وإنما عن طريق تركيبتها أيضاً، بعبارة أخرى عبر التجاوز المكاني لمختلف الأنواع الشجرية ومختلف أحجام الأشجار. تعطي التركيبة معلومات عن توزيع صفات الأشجار داخل المشجر الغابي. من هنا لزم التمييز بين التركيبة البسيطة والتركيبة المكانية. يتم وصف التركيبة البسيطة عن طريق التوزيعات التكرارية لصفات الأشجار، اما التركيبة المكانية فإنها تتم عن طريق توزيع العلاقات بين الأشجار المتجاورة. من المتغيرات المهمة في العمل الغابي قطر الشجرة عند مستوى الصدر (DBH) وإرتفاع الشجرة (H). سيتم الحديث عن التوزيعات التكرارية لهذين المتغيرين في مثال من

منطقة سولينق بألمانيا لمربوع مكون من أشجار صنوبر (*Picea abies*) عمره 116 سنة. مساحة مربوع العينة 0.16 هكتار وعدد الأشجار 41 شجرة. كانت قياسات أقطار هذه الأشجار كما في الجدول (1.4).

القطر عند مستوى الصدر (سم)
41, 41, 38, 53, 44, 42, 50, 43, 40, 44, 40, 33, 39, 32, 49, 47, 38, 40, 37, 34, 47, 37, 41, 38, 38, 43, 40, 42, 34, 39, 41, 44, 41, 45, 43, 36, 36, 46, 46, 34, 50

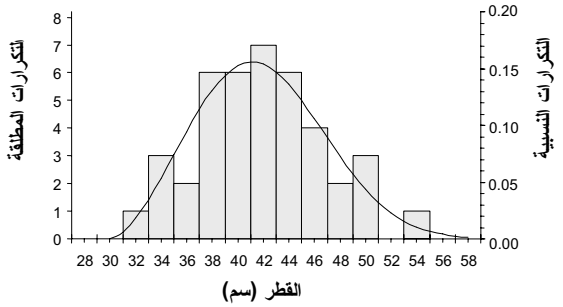
الجدول(1.4): قائمة بأقطار الأشجار (بالسنتمتر) لمربوع عينة صنوبر (Picea abies) يبلغ من العمر 116 سنة في منطقة سولينق بألمانيا.

تنظم قياسات الأقطار لاي مشجر عادة بوضعها في جدول تكراري. لتحقيق هذا الهدف تشكل عادة صفوف أقطار، لكل صف قطر متوسط صف، ثم توزع القياسات الخاصة بأقطار الأشجار على هذه الصفوف. الجدول (2.4) يوضح توزيع الأقطار التي وردت في الجدول (1.4) بعد تحديد متوسطات صفوف الأقطار.

القطر	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54
العدد	1	4	2	6	6	7	6	4	2	2	0	1

الجدول (2.4): توزيع الأقطار عند مستوى الصدر (من الجدول 1.4) في صفوف أقطار (مدى الصف= 2سم)

تنقسم التكرارات الى نوعين: تكرارات نسبية وأخرى مطلقة، والنوع الذي سيطبق يعتمد على نوع إستخدام المعلومات. يمكن ترجمة التكرارات النسبية على أنها إحتمالات تحدد لاي شجرة بالمشجر وضعها في صف القطر الذي يناسبها في التوزيع القطري. لهذا الغرض تتحول التكرارات التي تم قياسها منفردة الى توزيعات ثابتة محددة كل داخل صف القطر الذي يناسبه. من النماذج الرياضية واسعة الإنتشار في هذا الصدد معادلة ويبل (Weibull-function) (الشكل 9.4).



الشكل (9.4): التوزيع المطلق والنسبي. توزيع القياسات المفردة على صفوف أقطار (بمدى 2سم) في شكل هستوغرام. المنحنى هو تطبيق لمعادلة ويبل.

لا يمكن بإستخدام معادلة ويبل حساب الإحتمال الذي يعطي متغير معين (القطر مثلاً) قيمة معينة. لكن من الممكن وضع المتغير في مدى محدد لا يتجاوزه. يمكن فهم جزيئات المساحة تحت المنحنى على أنها إحتمالات. يطلق على هذا النوع من المعادلات معادلات الكثافة (Density functions). نظراً للصعوبة النسبية لمعادلة الكثافة في توزيع ويبل، تجمع كل التكرارات ومن ثم يتم الحصول على توزيع تكراري تراكمي (الشكل 10.4). عبر تكامل معادلة ويبل للكثافة يمكن الحصول على المعادلة التراكمية لتوزيع ويبل ذي الثوابت الثلاثة. (المعادلة 20.4، الشكل 10.4).

$$F(x) = P(X \le x) = \int_{-\infty}^{x} D(X)dX = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \qquad (20.4)$$

حيث:

X = قطر يتم إختياره عشوائياً (أي قطر)

X = القطر الذي يراد حساب إحتماله، بحيث يكون أصغر من القطر الذي يتم إختياره عشوائياً(X).

D(X) = معادلة الكثافة للمتغيرات الموزعة حسب توزيع ويبل عشوائياً

F(x) = P(X≤ x)= المعادلة التراكمية للتكرارات للمتغير (X) بناءاً على توزيع ويبل

a = ثابت يحدد الموضع في معادلة ويبل

b = ثابت يحدد المقياس في معادلة ويبل

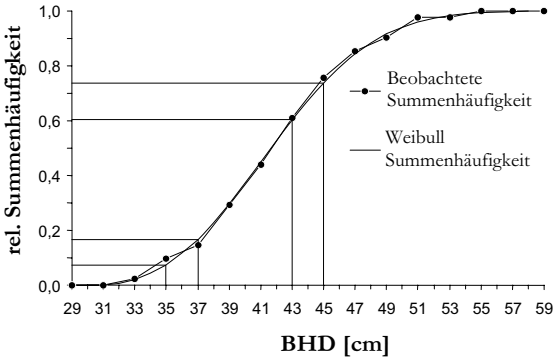
c = ثابت يحدد الشكل في معادلة ويبل

يتحدد شكل معادلة ويبل عن طريق الثوابتb و a

مثال: تبلغ تكرارت الأشجار في وصف القطر 44 بإستعمال معادلة ويبل:

$$[P(43 \le BHD \le 45)] = P(BHD \le 45) - P(BHD \le 43) = F(45) - F(43) = 0.74 - 0.6 = 0.14.$$

عند ضرب هذه القيمة في عدد الأشجار يتحصل الإنسان على: 0.14× 41= 5.74 =6 شجرات



الشكل (10.4): التوزيعات التكرارية التراكمية للأقطار ومنحنيات القيم الحقيقية وتلك التي تم حسابها عن طريق معادلة ويبل (ت ت= التكرارات التراكمية، ح= التكرارات الحقيقية، و= تكرارات ويبل).

تقرأ المعادلة العامة لحساب ترارات ويبل في صف القطر كالآتي:

$$P(X_u < X \le X_o) = F(X_o) - F(X_u) = e^{-\left(\frac{X_u - a}{b}\right)^c} - e^{-\left(\frac{X_o - a}{b}\right)^c} \qquad (21.4)$$

حيث: (u) و(o) هما الحدان الأدنى والأعلى لصف القطر.

عند عكس معادلة ويبل يمكن الحصول على شكل يسمح بحساب تطور تركيبة المشجر.

$$F(X) = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}$$

$$X= a+b\cdot\left[-\ell n\left(1-F(x)\right)\right]^{\frac{1}{c}}$$

$$X= a+b\cdot\left[-\ell n\left(P(X>x)\right)\right]^{\frac{1}{c}}$$

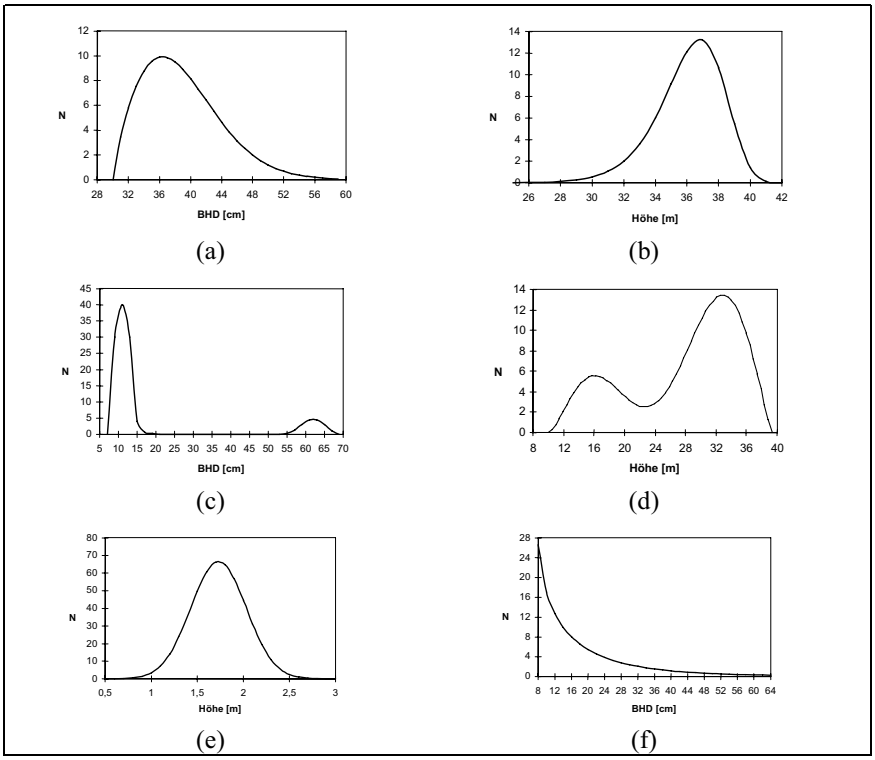
حيث:

$P(X \geq x)$ = إحتمال أن يكون القطر الذي تم إختياره أكبر من (x) و(a,b,c= توابت معدلة ويبل).

السؤال الذي يجب ان يجد إجابة بعد عكس معادلة ويبل إذن هو: كم يبلغ قطر الشجرة التي يبلغ إحتمال إختيار شجرة اكبر منها حجماً يساوي 50% مثلاً؟ أو السؤال بعبارة أخرى: كم يبلغ قطر الشجرة التي يساوي عدد الأشجار التي تفوقها حجماً نصف العدد الكلي للأشجار؟ الإجابة على هذا السؤال نحصل عليها من الشكل (10.4).

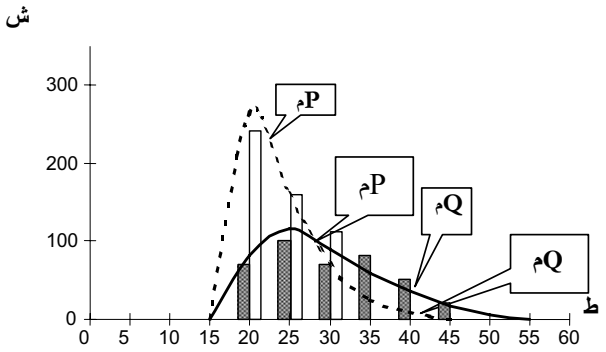
$$x = 30 + 13.4 \cdot \left[-\ln(0.5)\right]^{\frac{1}{2.6}} = 41.6$$

يتم حساب التوزيعات القطرية عندما نعطي إحتمال $P(X\geq x)$ أي قيم عشوائياً بين صفر و1 ثم إستعمال المعادلة (21.4) لحساب الأقطار المطابقة. بعد ذلك يمكن وضع القيم التي تم الحصول عليها في شكل صفوف أقطار يمكن الإستفادة دائماً من الشكل (10.4) للتأكد من سلامة الآلية التي بها تم الحساب. كلما زاد توزيع المعادلة إرتفاعاً عن صف قطر معين، كلما زادت المسافة على المحور الصادي، وهذا إنعكاس للزيادة التي طرأت على المحور السيني (حيث صفوف الأقطار). يمكن لتوزيع ويبل أن يكون مشابهاً جداً للتوزيع المثالي أو النموذجي (Normal distribution) ولكنه يمتاز عليه بأنه يستطيع أن يعبر عن ميل نحو اليمين أو اليسار. يمكن أن نلاحظ مثل هذا الميل في الشكل رقم (11.4) الذي يوضح توزيعات أقطار في مشجر متساوي الأعمار. بالإضافة لهذه التوزيعات التي ذكرت هنالك الكثير من التوزيعات. الشكل (11.4) يوضح بعض التوزيعات المشهورة.



الشكل (11.4): توزيعات تكرارية: (a): القطر في مشجر نقي متساوي العمر (ميل نحو اليسار)، (b): إرتفاعات الأشجار في مشجر نقي متساوي العمر (ميل نحو اليمين)، (c): القطر في مشجر تجاوز مرحلة النضج، (d): إرتفاعات الأشجار في مشجر من طبقتين (توجد قمتان)، (e): إرتفاعات الأشجار في مشجر صغير العمر ونقي ومتساوي العمر، (f): القطر في غابة طبيعية لا تخضع لأي إدارة غابات (منحنى ممتد).

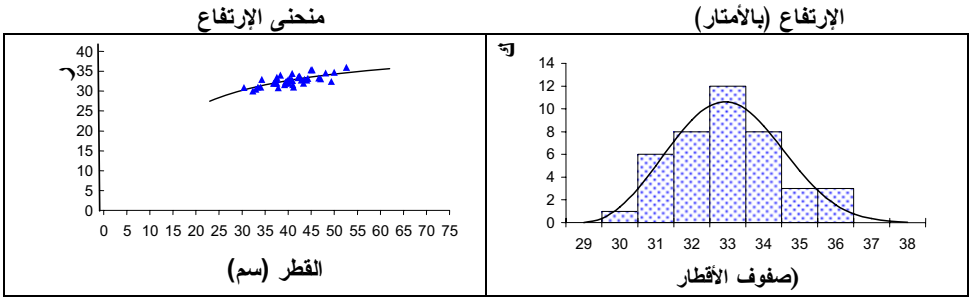
تستعمل معادلة ويبل لعرض التوزيعات ثنائية القمة، كما يمكن إستعمالها كذلك لوصف التوزيعات القطرية في المشاجر المختلطة (الشكل 12.4).



الشكل (12.3): التوزيعات القطرية في مشجر مختلط (صنوبر (Picea abies)- بلوط (Qercus petraea) (أخذ من شونق، 1996) (Qم ،= توزيع المتوقع، Qم= توزيع Qercus petraea الحقيقي، Pح= توزيع Picea abies الحقيقي، = صفوف الأقطار، ش= عدد الأشجار في الهكتار، ث= ثابت توزيع ويبل).

من الصفات التركيبية المهمة ايضاً في المشجر توزيع الإرتفاعات والتي تعرف بتركيبة الإرتفاعات أو التركيبة الرأسية للمشجر. تعتبر الإختلافات في التركيبات الرأسية نتيجة حتمية لإختلافات المعاملات الفلاحية.

لتوزيع الإرتفاعات يمكن إستخدام النهج الذي اتبع مع التوزيعات القطرية. الشكل (13.4) يوضح توزيع إرتفاعات تم استنباطها من منحنى إرتفاع مشجر الصنوبر الذي يبلغ عمره 116 سنة ورد ذكره آنفاً.



الشكل (13.4): *منحنى ارتفاع المشجر (إلى اليسار) وتوزيع الإرتفاعات (إلى اليمين) لمشجر Picea abies يبلغ من العمر 116 سنة (ر= الإرتفاع بالأمتار، ك= التكرارت بالمطلقة).*

أن تكلفة قياسات الإرتفاعات في المشجر عالية (في العادة). يمكن الحصول على معادلة التوزيع (بشكل غير مباشر) عن طريق منحنى الإرتفاع. هذه تمثل، كما هو معروف، العلاقة بين القطر عند مستوى الصدر والإرتفاع ، حيث يوجد العديد من أنواع المعادلات التي يمكن الإختيار من بينها. في المشاجر ذات التركيبة البسيطة تكفي في العادة المعادلة اللوغرثمية البسيطة (المعادلة 23.4).

$$H = a_0 + a_1 \,.\, \ln(BHD) \qquad (23.4)$$

عند تحليل الإنحدار للإرتفاع يحصل الإنسان من المعادلة (23.4) على

$$F(H) = 1 - e^{-\left(\frac{e^{(H-a_0)/a_1} - a}{b}\right)^c} \qquad (24.4)$$

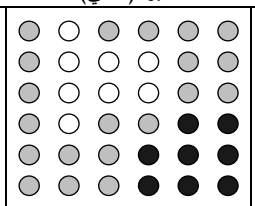
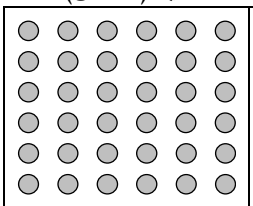
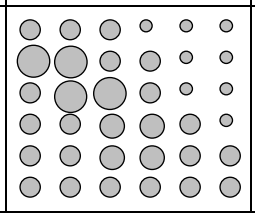
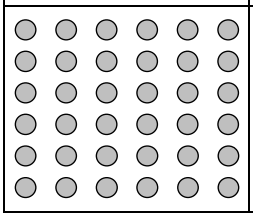
حيث: a,b,c= ثوابت ويبل لتوزيع الأقطار

(5.4) التركيبة المكانية– التوزيع المكاني

من عيوب توزيع تكرارات اقطار وإرتفاعات الأشجار أنها لا توضح التوزيع المكاني للأشجار. انه ليس من الصعب وضع تصور لعدة مشاجر تتطابق في اقطارها وإرتفاعاتها وتكون في نفس الوقت مختلفة تماماً في تركيبتها المكانية (اي توزيعها). بدأت المتغيرات التي تصف تركيبة المشجر والتنوع الاحيائي تكسب إهتماماً متزايد في الآونة الأخيرة. لثوابت التركيبة المكانية القدرة على وصف التنوع وكذلك وصف درجات تباين الموضع. من المتطلبات الأساسية للإدارة الفنية للغابات تعريف مؤشرات تركيبية للإستدامة (Structure indicators) وهي تساعد على تقييم عمليات القطع (والتخفيف)، خصوصاً في الغابات المختلطة.
يصف مصطلح (تركيبة) التنظيم المحدد لعناصر أي نظامز بهذا المعني فإن تركيبة الغابة تعني توزيع خصائص الأشجار داخل الغابة. وصف تركيبة الغابة عبر متغيرات بالمقارنة بين الحالة الموجودة (الراهنة) ووضع أو عدة أوضاع تصورية.

1.5.4. جزئيات الأنواع والأحجام

يهتم وصف التركيبة البسيطة للغابة بجزئيات صفات أو خصائص معينة داخل المجموعة الكلية، مثل جزئية الأنواع الشجرية أو جزئية الأحجام المختلفة للاشجار (الشكل 14.4).

متغير	كثير (عالي)	قليل (منخفض)	
مؤشر شانون			**الثروة النوعية** Aggregation
توزيع الإقطار			**الثروة الحجمية** (size class richness)

الشكل (14.4): الصفات البسيطة لتركيبة الغابة (لم يؤخذ التوزيع المكاني لصفات الأشجار في الحسبان).

يمكن وصف الثروة النوعية (عدد أو كمية كل نوع شجري) وتنوعها عن طريق مؤشر شانون ورفر (1949) كالآتي:

$$H'(p_1, p_2, ..., p_S) = -\sum_{i=1}^{S} p_i \ell n(p_i) \qquad (25.4)$$

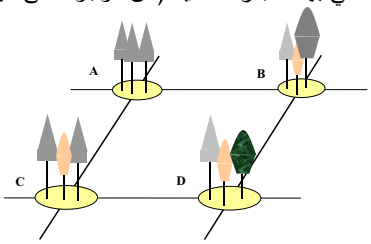
حيث:

S = عدد الأنواع الشجرية الموجودة.

P_i = N/n_i، حيث (n_i) = عدد أفراد النوع (i)، و(N)= العدد الكلي للأفراد (الأشجار).

يستوجب مؤشر شانون ثلاثة شروط، هي: (أ) ان يصل تعدد الأنواع الى أقصى قيمة له عندما، يمثل كل نوع بأعداد متساوية (ب) إذا تم تقسيم الأنواع الى (مجموعتين) بالتساوي، فإن المجموعة التي تحتوي على عدد أكبر من الأنواع تحظى بدرجة أعلى من التنوع. (ج) تم إستخدام تصنيف إضافي (تقسيم إضافي، مثلاً على أساس صفوف إرتفاعات) ولم يعتمد أي من الصفين على الآخر (بمعني أن معرفة النوع لا تحتوي على معلومة الإرتفاع)، فإن التنوع الذي يربط النوع بالإرتفاع يكون مساوياً لحاصل جمع التنوع.

يمكن تصنيف الثروة الحجمية على اساس توزيع الأقطار أو توزيع أحجام الأشجار أو أطوال التيجان أو مساحات التغطية التاجية. من الممكن إستخدام مؤشرات التنوع البسيطة عند تقييم مرابيع عينة دآئمة (محددة) ولا يمكن إستخدامها في المناطق التي بها أشجار هامشية (لأن للوجود على الهامش بعض الآثار).

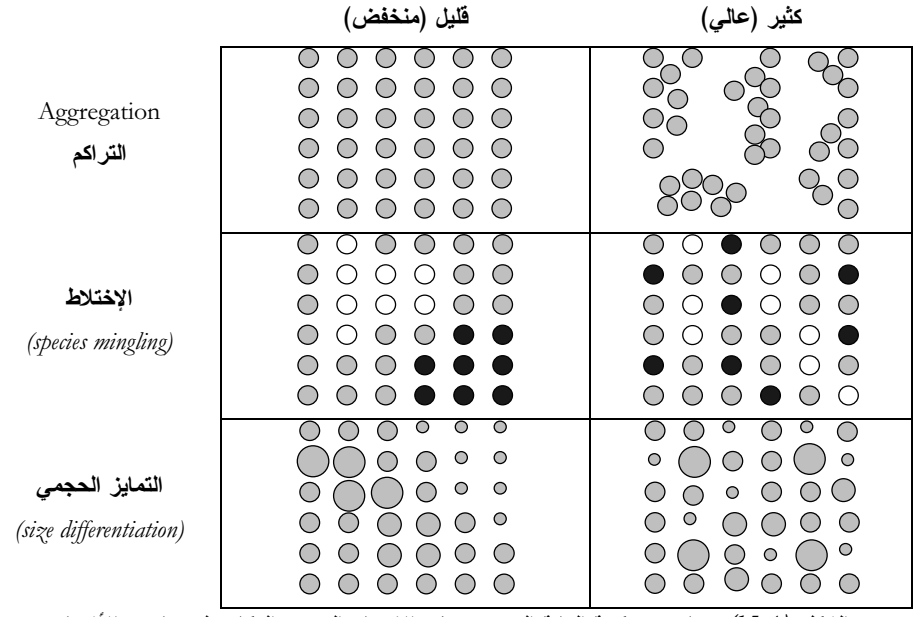


داخل مرابيع عينة دائمة محددة يمكن التعبير ببساطة عن التركيبة، وذلك لأن الجزئيات توضح (في نفس الوقت) التنوع في المكان (A= تجانس في المكان، B= عدم تجانس في المكان).

2.5.4. عناصر التركيبة المكانية

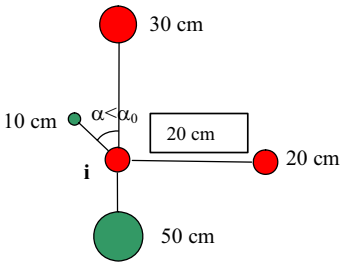
لتحليل التركيبة في الغابات غير النقية (بها عدة أنواع شجرية) ومتعددة الأعمار هنالك حاجة، بالإضافة للتوزيعات التكرارية، الى معلومات أخرى، مثل درجة إختلاط جزئيات الأنواع الشجرية وأحجامها. لهذا الغرض يمكن إستخدام عناصر التركيبة المكانية (الشكل 15.4).

في الغالب لا يكفي ذكر إختلافات أحجام الاشجار المتجاورة لوصف التركيبة الحجمية. من الأشياء المهمة أيضاً السيادة النسبية لنوع شجري معين. لتصنيف السيادة، يمكن إستعمال معيار أو مقياس المحيط (Surrounding measure) بالإضافة الى (أو بدلاً عن) التمايز (Differentiation) ويحدد معيار المحيط جزئية الأشجار المجاورة التي تكبر الشجرة المرجعية وتعتبر مؤهلة بذلك لإعطاء فكرة عن تركيبة المشجر. إستعمل البيرت (1998) السيطرة على اساس الحجم كمقياس للوضع النسبي للشجرة المرجعية وسط الأشجار المحيطة بها (مقياس للوسط المحيط)، وأيضاً للتعبير الكمي للإختلافات في القيم (التمايز).



الشكل (15.4): عناصر تركيبة الغابة التي تضع في الإعتبار التوزيع المكاني لخصائص الأشجار

يعتبر الحصول على المتغيرات التي تصف التركيبة المكانية سهل نسبياً. يجب أن تحدد (من نقطة معينة داخل مربوع العينة) الشجرة المرجعية التالية والأشجار المجاورة لها، ليس بالضرورة قياس المسافات بين الأشجار. مثال: الشكل (18.4) يوضح مجموعة مكونة من خمس شجرات (الشجرة المرجعية (i) وجاراتها الأربعة) والأقطار عند مستوى الصدر: ثلاثة من الشجرات الخمسة عريضة الأوراق وإثنتان إبرية الأوراق، توجد زاوية وآحدة α اصغر من الزاوية المعيارية α_0 (α_0 للجارات الأربعة = 4/360= 90 درجة). الشكل (16.4).



الشكل (16.4): تحديد الشجرة المرجعية (i) داخل مربوع العينة والاشجار المجاورة لها (cm= سنتمترات)

من الشكل (18.4) نتجت لمجموعة الخمسة شجرات قيم الثوابت الآتية.

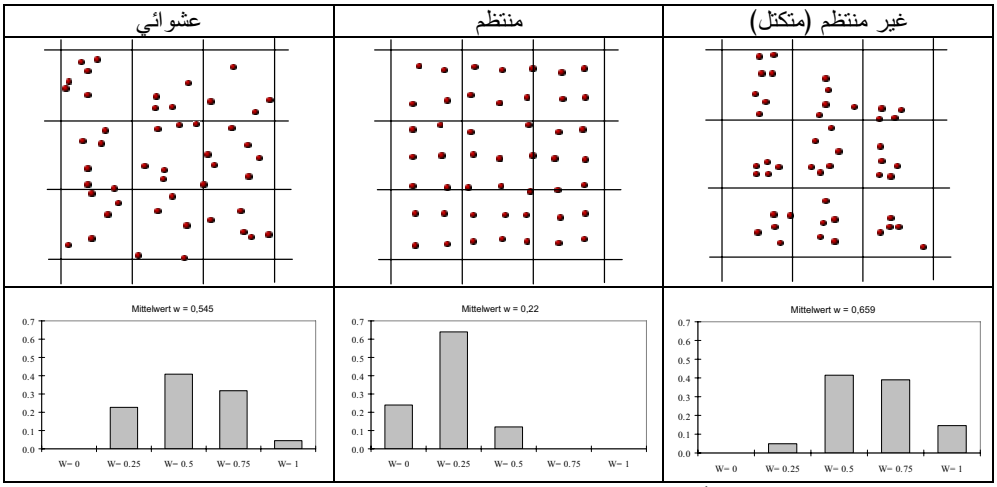
W_i =(1+0+0+0)/4= 0.25

M_i =(1+1+0+0)/4= 0.50

T_i = (20/20−1+20/10−1+40/20−1)/4= 0.33.

من المهم جداً عند ترجمة نتائج القياسات التمييز بين جزئيات عدد الأشجار وجزئيات المساحة لصفوف التركيبة ويجب الربط بين موضع الشجرة داخل المشجر وخصائص التركيبة. بما أن احتمال أختيار شجرة مرجعية يتناسب طردياً مع مساحتها الطبغرافية، فإنه يمكن تحديد جزئية المساحة لخصائص التركيبة بدرجة معقولة من الدقة (شتاوبندال، 1997– البيرت، 1998).

الشكل (16.4) يوضح قوة مقياس (معيار) الزوايا لتصنيف التوزيع الفردي. يمتاز هذا المقياس بسهولة الإستخدام في أي موقع. بمساعدة القيمة الوسطية (المتوسط) الذي يرمز إليه عادة ب (W) يمكن توزيع الأفراد في مشجر غابي بدرجة عالية (نسبياً) من الدقة الى ثلاثة صفوف: عشوائي (Random) وغير منتظم (Irregular) أي في شكل مجموعات. الشكل (20.4) يوضح ثلاثة أشكال لتوزيع الأشجار على أساس مقياس الزوايا.



الشكل (17.4): مواقع الأشجار توزيعاتها بناء على قيم (W) لثلاثة مشاجر تحتوي على: التوزيع العشوائي والتوزيع المنتظم والتوزيع في شكل مجموعات (التوزيع بناءاً على مكان الاشجار داخل المشجر) (W= متوسط المسافة).

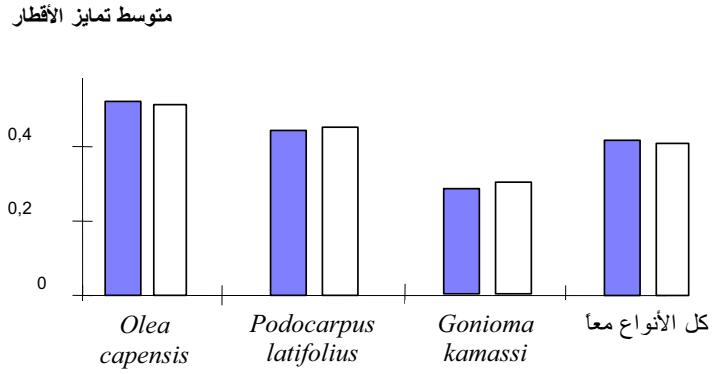
3.5.4 تكرار التركيبة الغابية Reproduction of forest structure

يهدف التكرار المكاني لتركيبات المشاجر (من قياسات مرابيع العينات) الى توسيع وصف حالة الغابة وفي نفس الوقت يعتبر شرطاً لاستخدام النماذج الرياضية للأشجار المفردة المرتبطة بمواضع معينة. يجب توزيع الأشجار (التي تم قياسها داخل نماذج عينة وتم وصفها عبر توزيع الأنواع والاقطار عند مستوى الصدر)

داخل مساحة المشجر في حدود خارجية معروفة الدرجات ان التوزيعات الي تحسب عن طريق مقياس الزوايا (التمايز بناءاً على الأحجام ودرجات الإختلاط) تتطابق مع توزيعات المشجر الأصلي.
في المرحلة الأولى للعملية الحسابية (Simulation) يتم تحديد إحداثيات الشجرة، أما المرحلة الثانية فتهتم بتكرار درجة الإختلاط (تداخل الأنواع الشجرية) وهنا يتم تدريجياً تبديل كل شجرتين لتحل إحداهما مكان الأخرى، مع الأخذ في الإعتبار فقط الأشجار مختلفة الأنواع، وذلك لان تبادل أشجار من نفس النوع لا يعبر عن أختلاط أو تبادل الأنواع.
تهتم المرحلة الثالثة بتمايز أقطار الأشجار عند مستوى الصدر (Diameter differentiation). هنا يتم تبديل أزواج الأقطار (لكل شجرتين)، ولكن هذه المرة تكون الأشجار من نفس النوع. حتى يتم الحصول على وضع يتناسب مع المشجر الأصلي. تحسب جودة التناسب عن طريق متوسط الخطأ (وهذا يتم حسابه من الفروقات بين المشجر الأصلي والمشجر التصوري الذي تم حسابه عن طريق النموذج االرياضي). لقد ثبت أن الحساب الذي يتم في مراحل متتالية (Algorithm) مع أخذ متغيري التركيبة (تدخل الأنواع الشجرية والتمايز بين الأقطار) يؤدي دائماً الى نتائج جيدة. هنالك طرق بديلة تعرف بمولد التركيبة (Structure generator) توصل إليها بريتش (1993)، وفي هذه الطريقة يتم أيضاً تكرار تركيبة المشجر وتمتاز على سابقتها في ان التركيبة المكانية تعتمد على أوصاف بسيطة للمشجر تكون دائماً متاحة.

5.5.4. التركيبات المكانية الحقيقية (الماثلة) والمتوقعة

تعمل ثوابت التركيبة على تسهيل تحليل حالات الغابات المعقدة والتغيرات التي تطرأ عليها عبر عمليات القطع. يمكن لغابتين بهما نفس العدد من الأشجار و التوزيع النوعي ونفس التوزيع القطري لنفس الأنواع الشجرية أن تكونا مختلفتين تماماً في تركيبتيهما. من الممكن أن يكون سبب هذه الإختلافات توزيع مقياس الزوايا أو طريق توزيع مختلف الانواع الشجرية (الإختلاط) أو الإختلالاف في الأحجام. من خلال ذلك فانه من الممكن مقارنة المشاجر مع بعضها البعض، ولكن يفتقر مثل هذا النوع من المقارنات الى المعيار المطلق (القيمة المرجعية المحايدة).
بمعرفة إحداثيات سيقان الأشجار عند مستوى الأرض، يمكن ترتيب صفات الأشجار (النوع الشجري، القطر عند مستوى الصدر) عشوائياً. إذن فالقيمة المرجعية المقبولة هي القيمة المتوقعة لمتغير التركيبة. تسمح هذه الطريقة بمقارنة ثوابت الغابة الحقيقية (Observed forest) والغابة العشوائية التي يتم تركيبها (Random forest). عن طريق التباديل والتوافيق يمكن حساب قيمة إختبارية عشوائياً (Test value) وتساعد هذه في تقييم درجة الإنحرافات. لهذا الغرض تم في ألمانيا تحليل 1000 غابة عشوائياً، وقد كانت الإنحرافات بين الثوابت الحقيقية والمتوقعة في الغابات البحثية في ألمانيا كبيرة جداً في الجانب الآخر وجد شرودر (1998) لمتوسط التمايز القطري توافقاً (تطابقاً) كبيراً في إحدي الغابات الطبيعية (الشكل 18.4).
لقد تم حساب قيمة مرجعية عامة عن طريق النظام الحسابي المتكرر (Simulation)، وتستمد هذه القيمة المرجعية أهميتها من أنه يمكن عن طريقها تقييم أي مشاجر غابية على درجة إنحرافها من التركيبة المثالية. من هنا تلوح في الأفق إمكانية مقارنة تركيبات الغابات الطبيعية مع الغابة المزروعة (الإقتصادية) ومن ثم تقييمها.



الشكل (18.4): التمايز الحقيقي (العمود على اليسار) والمتوقع (العمود على اليمين) لثلاثة أنواع شجرية والغابة الكلية في غابة كبيسنا الطبيعية مع اخذ الشجرة الأقرب في الحسبان.

5. نمو المشاجر النقية متساوية العمر

يمثل تطوير نماذج رياضية بنمو المشاجر وإنتاجها مسألة مركزية في البحوث المتعلقة بنمو الغابات. يعتمد تحضير المعلومات للتخطيط الغابي على التنبؤ بالتطور الحقيقي للمشاجر، التي تعرف حالتها الراهنة جيداً، في حين أن تخطيط الإنتاج في المصانع التي تعتمد على الأخشاب كمادة خام يتطلب التنبؤ بإنتاج مصنف في مناطق غابية واسعة. توفر البحوث في علم نمو الغابات ليس فقط الوسائل لهذه التنبؤات، وإنما تهتم أيضاً بوصف القوانين العامة التي تحكم تطور الغابات. في كل هذا يكتسب تحليل تطور الغابة في تفاعلها مع مختلف الأنشطة داخل الغابة إهتماماً خاصاً. يعتمد التنبؤ بتطور الغابات النقية متساوية العمر على جداول الإنتاج النموذجية (المثالية) التي يتم تصميمها بناءاً على معلومات جمعت في زمن محدد (معلومات ستاتيكية)، ولكن مع مرور الزمن زاد إستعمال النماذج الرياضية للنمو مع أخذ الكثافات الشجرية المختلفة في الحسبان.

1.5. جمع المعلومات

يتطلب الإستثمار في الغابات فهم المسائل البيلوجية والقوانين والأسس التي تحكم ذلك. تشكل معرفة معدلات التغيرات البيلوجية في تفاعلها مع الظروف الراهنة أساساً لهذا الفهم. تمكننا هذه المعرفة من تصميم برامج حاسوبية تساعد العاملين في مجال الغابات على تقييم تاثيرات مختلف المعاملات الفلاحية. من الوسائل المهمة في هذا الصدد النماذج الرياضية للنمو والتي يتم تصميمها على اساس معلومات تجريبية.

تصمم معظم النماذج الرياضية لأهداف محددة جداً، وهي تختلف فيما يتعلق بإمكانية تعميمها وفيما يتعلق بدقتها (أي الخطأ المرتبط بالتنبؤ عن طريقها). يمكن الوصول الى درجة عالية من الدقة، ولكن يتحقق ذلك دائماً على حساب مدى التطبيق (تزيد الدقة كلما ضاق مدى التطبيق) ومن ثم يرتبط إختيار نموذج رياضي مناسب، على قدر من التنازل. من أشهر أنواع النماذج الرياضية للنمو:

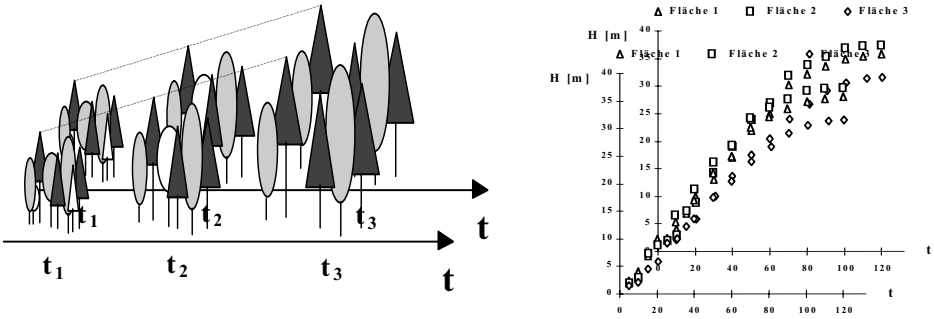
1. النماذج الرياضية التي تربط العمر مع الحجم تراكمياً، وتستعمل لحساب الأخشاب المنتجة في منطقة ما.
2. النماذج الرياضية للمشاجر، وهذه تعطي تنبؤات بتطور الإرتفاع والمساحة القاعدية وعدد الأشجار.
3. النماذج الرياضية للشجرة الممثلة (Representative tree) وهي تصف تطور توزيع الأقطار ومنحنيات الإرتفاع في المشجر.

يتم الحصول على القاعدة المعلوماتية لهذه النماذج (إلى حد كبير) من مرابيع العينات. في العادة تستعمل معلومات لمرابيع أنشئت لأغراض مختلفة، مثلاً مرابيع أنشئت لمعرفة تأثير عمليات التخفيف أو مرابيع أنشئت لدراسة تأثير المسافات البينية أو غير ذلك. في تجارب إدخال أنواع جديدة تتم دراسة درجة توافق نوع شجري معين في موقع ذي خصائص معينة. في تجارب المسافات البينية والتخفيف (الشلخ) يتم بحث التاثيرات المختلفة للمسافات البينية ودرجات القطع على نمو الأشجار المفردة من ناحية، وعلى المشجر ككل من ناحية أخرى.

يمكن تقسيم مصادر المعلومات منذ بدء الإهتمام بالبحوث الغابية إلى ثلاثة أنواع: مرابيع العينة الدائمة، وهي مناطق محددة تراقب على مدى زمني طويل ويتم قياسها على فترات منتظمة، أما النوع الثاني فيعرف بالصفوف الزمنية غير الحقيقية ويتكون من أكبر عدد من العينات تقاس مرة واحدة وتشمل مدىً واسعاً جداً من الأعمار والمواقع بمختلف خصئصها. تستعمل هذه الطريقة لجمع المعلومات لتفادي الإنتظار الطويل الذي يتطلبه جمع المعلومات عن طريق مرابيع العينة الدائمة. كحل وسط هنالك النوع الثالث بطريقة تكرار القياس (Interval area concept) وفي هذا النوع يتم إتباع نفس المنهجية كما في النوع الثاني، غير أن مرابيع العينة هنا يعاد قياسها مرة أخرى (على الأقل).

1.1.5. مرابيع العينة الدائمة

ترجع معرفتنا الحالية عن تطور مختلف النظم الإيكولوجية (لحد كبير) إلى معلومات تم جمعها من مرابيع عينة دائمة على مدى فترات زمنية طويلة (قياسات متكررة). إعتمد جمع المعلومات عن أي جزئية على مدى عدة عقود زمنية وقد كان هنالك دائماً حرص على زيادة مواقع مرابيع العينة الدائمة، حتى خلال سنوات الحروب العالمية. بنت المعلومات التي جمعت من مرابيع عينة دائمة اساساً مهماً لتطوير نماذج رياضية للنمو مرتبطة بمعدلات فلاحية محددة. النماذج الرياضية التي تم تطويرها لبرامج تخفيف (شلخ) عيارية (أو مثالية) تعرف بجداول الإنتاج (Yield table). الشكل (1.5) يوضح مربوع عينة دائم تم فيه قياس إرتفاعات الاشجار ثلاثة مرات متتالية (الأشجار التي تبدو رمادية تمت إزالتها عبر عمليات التخفيف أو الشلخ المتتالية).



الشكل(1.5): الى اليسار: مربوع عينة دائم فيه قياس الإرتفاع ثلاث مرات، (t)= محور الزمن، الأشجار الرمادية أزيلت في عمليات تخفيف). الى اليمين: سلسلة معلومات إفتراضية من ثلاث مرابيع عينة دائمة.

من النماذج الرياضية التي تستخدم كثيراً في وصف نمو الإرتفاع مع العمر المعادلة المعروفة بمعادلة شابمان– ريتشارد، وهي تقرأ كالآتي:

$$H = a_0 \cdot \left[1 - e^{-a_1 \cdot t}\right]^{a_2} \qquad (1.5)$$

حيث أن: H= إرتفاع الأشجار بالمشجر (بالأمتار)، t= عمر المشجر (بالسنوات)، a_2, a_1, a_0 هي ثوابت النموذج الرياضي.

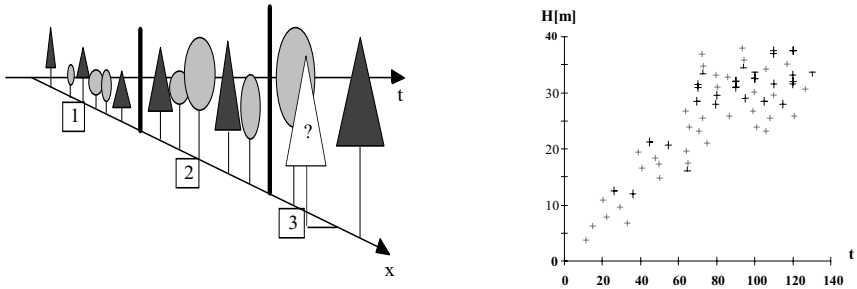
للمعلومات التي تجمع من مرابيع عينة دائمة الأفضلية في أنها توضح أنماط النمو المتعددة (Polymorphic growth patterns). من الممكن تطوير نموذج رياضي لكل مربوع عينة دائم. يعتبر هذا النموذج الرياضي نمطاً مختلفاً للنمو، إذا كان من الممكن إعتبار الثوابت التي تحدد الشكل (a_2 , a_1) دالة في تقييم خصائص المواقع بهذه الطريقة فإنه من الممكن تطوير نماذج رياضية متعددة للإرتفاع يتم التعبير عنها بمنحنيات متقاطعة. هنالك العديد من جداول الإنتاج التي اعدت على اساس معلومات من مرابيع عينة دائمة كما توجد نماذج رياضية للاشجار المفردة تعتمد على معلومات من مرابيع عينة دائمة. تبرز صعوبة مرابيع العينة الدائمة في أنها على بنية أساسية محددة للبحث، لذا فإنها تكون مرتبطة دائماً بتكاليف عالية. من عيوب مرابيع العينة الدائمة أيضاً أنه يجب الإنتظار طويلاً جداً للحصول على المعلومات المطلوبة، هذا بالإضافة الى أنه قد لا يمكن الوصول للهدف الذي من أجله أنشأت المرابيع لأنه من المحتمل أن تتعرض إلى ظروف قد تؤدي بها مبكراً.

2.1.5. الصفوف الزمنية غير الحقيقية

في كثير من الأحيان لا تتوفر معلومات توضح تطور الغابة. في مثل هذه الحالات يتم اللجوء إلى ما يعرف بمرابيع العينة المؤقتة (Temporary sample plots). تتم القياسات في مربوع العينة المؤقتة مرة واحدة فقط تغطي خلالها مساحات شاسعة تشمل مختل الأعمار ومختلف درجات جودة الموقع. بهذه الطريقة يتم تعويض قياس نفس المكان لعدة مرات (في فترات متتالية) بقياس عدة أماكن متجاورة في نفس الزمن. تجدر الإشارة هنا الى أن الإختلاف في أعمار المشاجر غير حقيقي (فهي أعمار مختلفة ولكنها قيست في نفس الزمن). إستعملت هذه الطريقة لأول مرة في القرن التاسع عشر.

في الطريقة البيانية تجمع معلومات من عدد من المشاجر ذات الكثافة الشجرية المثالية ومختلف الأعمار ذلك بغرض الإستفادة منها في تصميم جداول الإنتاج. بالطريقة البيانية التي إستخدمها هارتج (1868) تم حساب نمو الأشجار المفردة عن طريق تحليل الساق وبذلك أمكن الحصول بسرعة على معلومات نمو الشجرة. الشكل (2.5) يوضح فكرة الطريقة البيانية. تفصل المساحات ذات الأعمار المختلفة عن بعضها بواسطة خطوط رأسية. المحور السيني يوضح بطريقة مبسطة مكان الشجرة، أما الرمز (t) فيرمز لمحور الزمن. مازالت الصفوف الزمنية غير الحقيقية (مرابيع العينة المؤقتة) وتحليل الساق يلعبان دوراً مهماً، خصوصاً في

غياب معلومات من مرابيع عينة دائمة. إنه بالطبع من الممكن إعادة بناء تطور حالة متغير (كالإرتفاع مثلاً) بمساعدة تحليل الساق. الصعوبة التي تواجه هذه الطريقة هي عدم توفر معلومات عن الأشجار التي كانت تجاور الشجرة التي يتم تحليلها. ففي الشكل (2.5) كانت هنالك شجرة منافسة للشجرة التي تم تحليل ساقها (عليها علامة إستفهام). ليس هنالك أي معلومات عن هذه الشجرة، إلا (ربما) مابقي منها بعد اختفائها.

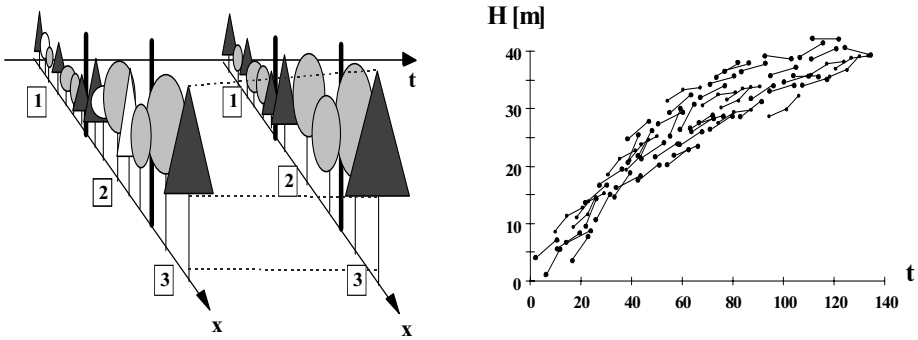


الى اليسار: ثلاثة مرابيع مؤقتة تغطي مختلف الأعمار، المحور السيني يمثل موقع الشجرة، (t)= المحور الزمني. إلى اليمين: معلومات عن الإرتفاعات والأعمار المطابقة لها (من صفوف زمنية غير حقيقية).

بعد الحرب العالمية الثانية تم تصميم بعض جداول الإنتاج على أساس معلومات من سلسلة زمنية غير حقيقية (مرابيع عينة مؤقتة). توضح هذه الجداول تطور الغابة عند تطبيق البرامج الفلاحية المثلى فقط ولا يمكن إستخدامها لحساب بدائل تخفيف (شلخ) متنوعة. من عيوب هذه الطريقة البيانية أيضاً أنها لا تعطي معدلات تغيير ولكنها تعطي فقط أزواج (عمر/إرتفاع) غير معتمدة على تطور فعلي. من هنا فإنه لايمكن تطوير نموذج رياضي يسمح بالتنبؤ بالحالة الحقيقية التي سيكون عليها الوضع في المستقبل، أما فيما يتعلق بنمو الأشجار (عن طريق تحليل الساق) فهنالك مشكلة إعادة بناء المنافسة التي خضعت لها الشجرة في الماضي، بمعنى أن الجوار المباشر للشجرة التي يتم تحليلها يكون (في العادة) مجهولاً تماماً. بالإضافة إلى كل ذلك فهناك بعض المتغيرات التي لا يمكن تحديدها مطلقاً، كالتغيير الذي يحدث لتاج الشجرة مثلاً.

3.1.5. مساحات تكرار القياس

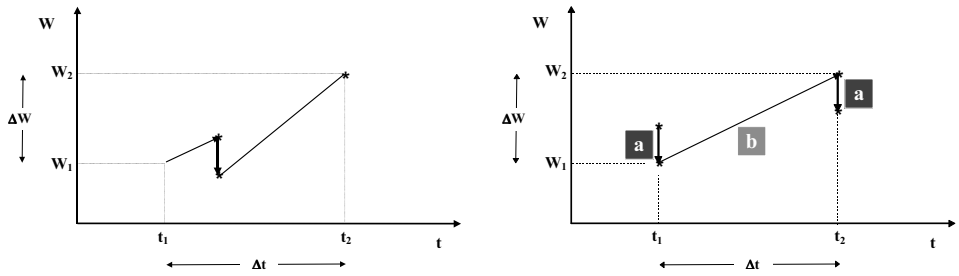
كحل وسط بين الطريقتين المذكورتين أعلاه، هنالك طريقة مساحات تكرار القياس. في هذه الطريقة يتم قياس مربوع العينة مرتين (على الأقل): مرة في بداية الفترة الزمنية وأخرى في نهايتها، بشرط أن تجرى أي عمليات قطع أو معاملات فلاحية خلال الفترة بين القياسين. يجب أن تكون هذه الفترة طويلة بقدر كافي بحيث يكون من الممكن حدوث توازن للتقلبات المناخية. الشكل (3.5) يوضح المعالم المميزة لفكرة تكرار مساحات القياس.



الشكل (3.5): إلى اليسار: ثلاث مساحات تكرار قياس: الأشجار باللون الرمادي تم قطعها عبر عمليات تخفيف (شلخ) إلى اليمين: المعلومات المأخوذة في المدى الزمني (مريتين لكل مساحة) كأساس لتصميم نموذج رياضي لحالة التغير.

لمساحات تكرار القياسات محاسن سلسلة الأعمار غير الحقيقية (المرابيع المؤقتة) وهو المدى الواسع الذي تغطيه فيما يتعلق بالحالة الراهنة للغابة والفترة الزمنية القصيرة (نسبياً) بين تحديد مرابيع العينة والحصول على المعلومات المطلوبة، كما لها أيضاً محاسن مرابيع العينة الدائمة التي تعطي معدلات تغيير لمختلف الحالات الإبتدائية لكل مربوع عينة (مثلاً معدلات تغيير إرتفاعات التيجان). يمثل المدى شريحة زمنية للنمو من دون إنقطاع بأي شيء طارئ. لا يجوز القيام بأي عمليات فلاحية خلال هذه الفترة الزمنية (المدي بين القياسين). من هنا فإنه لا يمكن إستخدام مرابيع عينة للمتابعة في هذه الطريقة. يجب جمع المعلومات في نفس الوقت الذي تجرى فيه عملية التخفيف. بهذه الطريقة يمكن الحصول على معلومات عن المتغيرات التي تحدث في النمو وتأثير عملية التخفيف. من الأشياء المهمة في تصميم النماذج الرياضية الخاصة بتطور الغابة (وحتى الآن يندر الإنتباه لها) التغيرات التي تنجم عن عمليات التخفيف.

يمكن تحديد (حصر) التغيرات الناجمة عن عمليات التخفيف في بداية فترة النمو(t_1) أو في نهايتها (t_2) أو في الفترتين معاً. في الجزء الأيسر من الشكل (4.5) هنالك عملية قطع لأشجار حدثت بين القياسين الأول والثاني. في هذه الحالة فإنه لا يمكن تحديد مقدار التغيير في النمو بشكل واضح. في الجزء الأيمن من الشكل تزامنت فترة القطع مع فترة القياس. هنا يمكن معرفة التغيير الذي حدث نتيجة للتخفيف وكذلك التغيير نتيجة للنمو.



(4.5): قياسان متتاليان لمعرفة معدل التغيير في النمو (W). إلى اليسار إستعمال خاطئ للفكرة (تأثير عملية التخفيف غير معروف). إلى اليمين إستعمال صحيح للفكرة: يوجد نوعان من التغيير (a) زيادة نتيجة للتخفيف و(b) زيادة نتيجة للنمو الطبيعي.

من النماذج الرياضية التي تستخدم كثيراً في حالة القياسات المتتالية (لمعرفة النمو) معادلة الفروقات الجبرية (كشكل من أشكال معادلات النمو). يستخدم هذا النوع عادة للأنواع الشجرية التي تمتاز بنموها السريع. تقرأ المعادلة كالآتي:

$$H_2 = H_1 \cdot \left[\frac{1 - e^{-a_1 \cdot t_2}}{1 - e^{-a_1 \cdot t_1}} \right]^{a_2} \qquad (2.5)$$

حيث:

H_1، H_2 = إرتفاعات المشجر في العمر (t_1) و(t_2) على التوالي

a_1 ،a_2 = ثابتي النموذج الرياضي

من الممكن في هذه الطريقة (تكرار القياسات في مرابيع العينة) لتحديد التغييرات بالنسبة لعدد كبير من حالات المشاجر في فترة زمنية قصيرة نسبياً، ومن محاسنها ايضاً المرونة، إذ يمكن تنفيذ مرابيع تكرار القياسات في اي زمن يتم إختياره بعد زمن القياس الأول. من محاسن هذه الطريقة أيضاً أنه يمكن الإستغناء من مساحات تم قياسها في السابق وإستبدالها بمساحات جديدة. من المعلوم أن أي إضافة لمساحات جديدة تعتبر إضافة حالات إبتدائية جديدة، وهذا حتماً أمر مطلوب.

هنالك بعض الجوانب التي لايمكن الإجابة عليها عن طريق مرابيع العينة الدائمة، التغييرات التي تطرأ على نمو الأشجار كردود فعل للتاثيرات المناخية أو كنتيجة للتغييرات التي تحدث في مواقع نمو الأشجار لا يمكن بحثها إلا من خلال مشاجر تتم متابعة تطورها على مدى زمني طويل. من هذا يتضح أنه لا يمكن الإستغناء

تماماً عن مرابيع العينة الدائمة، ولكن من المهم الا يكون عدد مثل هذه المرابيع كبيراً جداً (فهي باهظة التكلفة وتحتاج الى عمل مكثف). لهذه الاسباب ما عادت مثل هذه المساحات مناسبة للإستعمال في تصميم جداول إنتاج المشاجر النقية ذات العمر المتساوي، فهي لا توفر كل المعلومات الضرورية لتصميم النماذج الرياضية، نظراً لتعدد الحالات التي يمكن البدء منها وإختلاف أنواع التخفيف (الشلخ) فإن مرابيع العينة الدائمة تعتبر أنعكاس لحالات قليلة جداً (وبالتالي محدودة القيمة). وبالمثل فإن الحصر الغابي العادي ومرابيع المتابعة، اللذان يمارسان كثيراً في الإدارة الفنية للغابات، ليس لها القدرة على توفير معلومات جيدة لتصميم النماذج الرياضية وذلك لأنها لا تاخذ (في العادة) متزامنة مع (عمليات الشلخ)، نفس الشئ ينطبق على تحليل الساق الذي لا يعطي المعلومات المكتسبة عن طريقه أي إشارة للبيئة التي كانت (تاريخياً) تحيط بالشجرة التي يتم تحليل الساق لها ولا لتطور تاج الشجرة المعنية بالتحليل. إنطلاقاً من هذه المحددات والحاجة المتنامية لمعرفة التركيبات الغابية ونوع إختلاط الأنواع في الغابة فإنه تحتم إعادة التوجه كلياً فيما يتعلق ببحوث الغابات. فمن ناحية: هنالك حاجة لمعلومات جديدة لتطوير النماذج الرياضية الخاصة بالمشاجر المختلطة ومن الناحية الأخرى: توجد قوى عاملة مختصة بالإهتمام بهذه المشاجر الدائمة، يمكن الإستفادة منها في أنشطة اخرى أو الإستغناء عنها كلياً. يوجد عدد كبير من المشاجر التي أنشأت قبل أكثر من ثلاثين عاماً وتقاس بإنتظام حتى اليوم، على الرغم من أنه لا يمكن الإستفادة من المعلومات التي يتم الحصول عليها من هذه القياسات، وذلك لأنه عند تحديد هذه المرابيع كمرابيع عينة دائمة لم توضع (في ذلك الوقت) تقنية النماذج الرياضية المعروفة حالياً، في الحسبان. هنالك حاجة ماسة لرباط وثيق يربط بين المؤسسات البحثية (بمعارفها في مسائل البحث) من ناحية وفكرة وتنفيذ عمليات الحصر من ناحية أخرى.

2.5. النماذج الرياضية للإنتاج

يمكن عن طريق إستعمال النماذج الرياضية حساب الإنتاج الخشبي في منطقة غابية واسعة وهنا يتعلق بتنبؤات مبنية على اساس إفتراضات بسيطة للغاية. تحتوي الإفتراضات على معطيات ظروف موقع وعمليات وأنشطة غابية محددة. من الأمثلة لذلك جداول الإنتاج والمعادلات الرياضية البسيطة التي تعمل على وصف الإنتاجية. الشرط الأساسي والأولي لإستعمال هذه النماذج الرياضية هو: أولاً فهم العلاقات بين الكمية الكلية للإنتاج (GWL) الحجمي ومتوسط الزيادة السنوية الكلية للحجم (MAI) ومتوسط الزيادة السنوية الحالية (CAI). لتحديد الإنتاجية المرتبطة بالعمر في غابة ما يجب أن تتوفر أربعة متغيرات، وهي: الكمية الكلية للإنتاج الحجمي ومتوسط الزيادة السنوية الكلية في الحجم والزيادة الحالية في الحجم وزيادة الحجم خلال فترة زمنية محددة.

1.2.5. الإنتاج الكلي، المتوسط الكلي للزيادة السنوية، الزيادة السنوية الحالية

يمكن حساب الكمية الكلية للإنتاج الحجمي في عمر (t) ويرمز لها ب (GWL) عن طريق جمع حجم المخزون الخشبي الواقف في المشجر (V_t) وحاصل جمع الأحجام الناتجة عن كل عمليات التخفيف التي تمت بالمشجر منذ إنشائه (Df_i).

$$GWL_t = V_t + \sum_{i=1}^{t} Df_i \qquad (3.5)$$

مثال: في مشجر عمره 80 عاماً وجد أن حجم المخزون الخشبي الواقف يساوي 550متراً مكعباً وكميات الأحجام الناتجة من عمليات التخفيف حتى هذا العمر تساوي 250 متراً مكعباً. إذن GWL_{80}= 550 +250 =800 متراً مكعباً.

متوسط الزيادة السنوية الكلية في الحجم عند العمر (t) تساوي حجم المخزون الخشبي الكلي (GWL_{80}) مقسوماً على عمر المشجر (t):

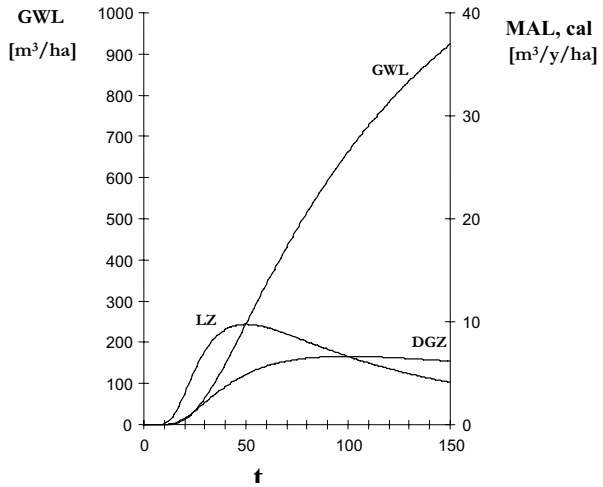
$$MAI_t = \frac{GWL_t}{t} \qquad (4.5)$$

مثال: في المشجر الذي ذكر في المثال السابق فإن متوسط الزيادة السنوية (MAI)= 80/800= 10 متراً مكعباً في الهكتار في السنة.

المقصود من الزيادة السنوية الحالية (CAI) معدل التغيير في منحنى النمو، وهي صفة لمعدل النمو في العمر المحدد.

$$CAI_t = GWL' = \frac{dGWL}{dt} \qquad (5.5)$$

تصل الزيادة السنوية الحالية قمتها عند نقطة إنقلاب منحنى النمو، أما متوسط الزيادة السنوية الكلية فإنه يصل الى قمته عندما يتقاطع مع منحنى الزيادة الحالية. منذ بداية العمر وحتى هذه النقطة يقع منحنى الزيادة الحالية أعلى من منحنى متوسط الزيادة الكلية، بعدها ينعكس الوضع تماماً. من هنا يتضح أن المصطلحات (GWL) و(CAI) و(MAI) تكون ذات معنى فقط إذا إرتبطت بالعمر. الشكل (5.5) يوضح العلاقات المهمة بين هذه القيم الثلاثة للنمو.



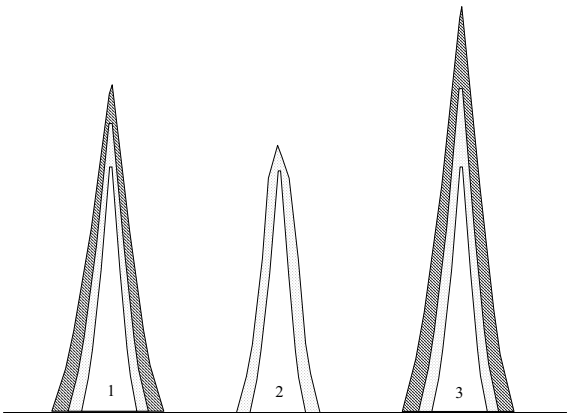
الشكل (5.5): العلاقات الأساسية بين القيم الثلاثة للنمو: الكتلة الكلية (GWL) و الزيادة السنوية الحالية (CAI) ومتوسط الزيادة السنوية الكلية (MAI) بالأمتار المكعبة في الهكتار والسنة، (t)= العمر بالسنوات.

الزيادة التي تحدث في فترة بين عمرين ($t_1 - t_2$) ويرمز لها ب (PI) تساوي الكمية الكلية للإنتاج في فترة محددة من العمر أي في مدى زمني محدد.

$$PI_{t_1-t_2} = \frac{GWL_{t_2} - GWL_{t_1}}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta GWL}{\Delta t} \qquad (6.5)$$

مثال: GWL_{65}= 470 متراً مكعباً في الهكتار، GWL_{60}= 400 متراً مكعباً في الهكتار، إذن PI= (470− 400)/5= 5/70= 14متراً مكعباً في الهكتار في السنة.

من هنا يتضح أنه يمكن تحديد الزيادة لفترة زمنية معينة بدون إرتباط بالعمر، لذا فمن الممكن إستعمال الزيادة لفترة معينة مع كل النظم الفلاحية. الشكل (6.5) يوضح مثالاً لحساب الزيادة خلال فترة معينة.



الشكل(6.5): مشجر يحتوي على ثلاث شجرات (لمناقشة الزيادة لفترة محددة).

يوضح اللون الأبيض داخل كل من الشجرات الثلاثة حجم الساق في العمر (t_1). حتى النقطة الزمنية (t_2) حققت الشجرات الثلاثة زيادة تساوي الجزء (المنقط) في كل منها. في هذه النقطة الزمنية قطعت إحدى الشجرات. حتى النقطة الزمنية (t_3) حققت الشجراتان المتبقيتان بالمشجر زيادة جديدة (الجزء المخطط في الشجرتين). إذن الزيادة خلال الفترة الزمنية (t_1) الى (t_3) تساوي (بدلالة الشكل أعلاه) مجموع الأجزاء المنقطة والأجزاء المخططة، أو:

$$PI_{t_1 - t_3} = (V_{13}-V_{11}) + (V_{22}-V_{21}) + (V_{33}-V_{31})$$
$$= (V_{13}+V_{33}) - (V_{11}+V_{21}+V_{31}) + V_{22}$$
$$= V_E - V_A + N$$

حيث: *(V_E)= الحجم النهائي عند (نهاية الفترة)، (V_A)= الحجم الإبتدائي (عند بداية الفترة)، (N)= حجم القطع الذي تم خلال الفترة أعلاه.*

2.2.3. جداول الإنتاج النموذجية

يمكن تحديد القوانين التي تحكم نمو المشجر عن طريق الجمع المتكرر للمعلومات من مرابيع عينة دائمة. كانت مثل هذه المعلومات تستعمل في تصميم جداول الإنتاج التي تعتمد على التطور الحقيقي في عدد كبير من مرابيع العينة. إن جداول الإنتاج سهلة الفهم ويسهل التعامل معها كنماذج رياضية لنمو وتطور أهم الأنواع الشجرية، وقد حظيت بإستعمال واسع في التخطيط الغابي التقليدي.

يمكن تعريف جدول الإنتاج على أنه نموذج رياضي للنمو يعمل على وصف تطور مشاجر غابية نقية (أي مكون من نوع شجري واحد) ومتساوية العمر تنمو في ظروف محددة. لا يقتصر دور جدول الإنتاج على التنبؤ بتطور المشجر فحسب، وإنما يفيد أيضاً كأداة توجيه عند تخطيط الإستغلال الغابي (قطع الأشجار) وتستعمل جداول الإنتاج أيضاً لتحديد الضرائب المستحقة على القطاع الغابي في البلدان المتقدمة. من وظائف جداول الإنتاج كذلك تحديد مكونات المشجر أثناء عمليات الحصر. بناءاً على القدرة الإنتاجية للموقع يمكن حساب تطور المشجر المتبقي عقب عملية التخفيف (الشلخ) وكذلك تحديد الناتج من عملية التخفيف والتي يتم تحديدها بناءاً على معطيات محددة (الجدول 1.5). من المدهش حقاً أن الشكل العام لجدول الإنتاج لم يتغير خلال المائتي سنة الماضية. هذا يدل على أن جدول الإنتاج كانت له القدرة دائماً في أن يوفي بالغرض من تصميمه والذي يتلخص في التخطيط الغابي متوسط وطويل الأمد.

	المشجر بعد التخفيف	الناتج من التخفيف				
العمر [بالسنوات]	عدد الأشجار	القطر	الإرتفاع [قدم]	الحجم	عدد الأشجار	الحجم
20	3644	2	12	5.95	-	-
28	911	4	24	11.92	2733	4.46
36	405	6	33	16.39	506	6.62
44	228	8	40	19.86	177	7.17
52	146	10	45	22.35	82	7.15
60	101	12	49	24.34	45	6.83
68	74	14	53	26.32	27	6.41
76	57	16	56	27.81	17	6.16
84	45	18	59	29.30	12	5.83
92	36	20	61	30.30	9	5.56
100	30	22	63	31.18	6	5.34
110	25	24	64	31.78	5	4.89
120	21	26	64	31.78	4	4.71

الجدول (1.5): جدول إنتاج لأشجار (Fagus sylvatica) تنمو في موقع جيد، صممه باولسن (1795).

تعطي جداول الإنتاج تقديرات لتطور القيم المرتبطة بالإنتاج الخاص بالمشجر عقب عمليات التخفيف وناتج التخفيف نفسه وذلك لنوع التخفيف (ينص عليها جدول الإنتاج). يتمثل دور جدول الإنتاج في الوصف العملي لعمليات التخفيف المخططة وفق الجدول وتقدير الناتج من هذه العمليات ثم التنبؤ بتطور المشجر بعد كل عملية تخفيف تصلح المعلومات التي يعطيها الجدول لنوع واحد فقط من أنواع التخفيف.
تشكل درجات التخفيف وجداول الإنتاج وحدة واحدة يعتمد عليها تنفيذ التخطيط الفلاحي حتى الآن. القيمة التي يتم بها الدخول عبرها إلى جدول الإنتاج هي مؤشر الموقع الذي يعتمد على إرتفاع وصف الإنتاج. لكل صف إنتاج أو مؤشر موقع يوجد جدول منفصل يحتوي على معلومات عن ناتج التخفيف والمتبقي بعد هذه العملية.
في العادة لا تتطور المشاجر الحقيقية تماماً كما ينص جدول الإنتاج، وذلك نتيجة للإنحرافات التي تحدث في الموقع وفي المعاملات الفلاحية. تتم معالجة مثل هذه الحالات عند التنبؤ بتطور المشجر، وحينها يتم تصحيح جداول الإنتاج.
من جداول الإنتاج المشهورة في ألمانيا جدول إنتاج النوع الشجري (*Fagus sylvatica*) الذي صممه فيدامان (1949).
هنالك العديد من جداول الإنتاج النموذجية التي صممت لأهم الأنواع الشجرية في القارة الأوربية (الجدول 2.5).

جدول الإنتاج	العمر بالسنة	الإرتفاع بالمتر	م م /هـــ/سنة MAI
Fichte			
ASSMANN U. FRANZ 1963	100	40,0	17
ZIMMERLE 1933	100	36,7	17
WIEDEMANN 1936/42	100	35,2	12
GUTTENBERG 1915 U. FRAUENDORFER 1959	100	37,3	15
GRIES 1965	100	38,2	14
FRAUENDORFER 1959	100	39,0	15
MØLLER 1933	70	32,0	19
ERIKSSON 1976	78	32,7	14
HAMILTON U. CHRISTIE 1971	80	36,7	21
WENK ET AL. 1985	100	37,8	15
EIDG. ANSTALT FORSTL. VERSUCHSWESEN 1983	100	44,6	19
Douglasie			
BERGEL 1985	100	48,0	20
KENK U. HRADETZKY 1984	100	54,0	23

HENGST 1958	75	34,7	15
HAMILTON U.CHRISTIE 1971	80	41,2	22
DECOURT 1972	65	36,6	20
KARLBERG 1961	61	36,2	21
Kiefer			
ZIMMERLE 1933	100	30,4	8
WIEDEMANN 1943	100	28,0	8
LEMBCKE ET AL. 1975	100	34,4	12
PETTERSON 1954	100	28,0	6
ANDERSSON 1963	100	24,0	6
HAMILTON U. CHRISTIE 1971	100	31,1	13
Buche			
SCHOBER 1972	100	32,4	8
DITTMAR ET AL. 1983	100	36,9	10
KENNEL 1972b	100	32,2	7
MØLLER 1933	100	33,0	13
CARBONNIER 1971	100	32,0	8
HAMILTON U. CHRISTIE 1971	100	33,0	10
EIDG. ANSTALT FORSTL. VERSUCHSWESEN 1983	100	39,2	13
JANSEN ET AL. 1996	100	40,1	11,9

الجدول *(2.5): الإرتفاع السائد ومتوسط الزيادة السنوية لأهم الأنواع الشجرية في أوربا لأفضل المواقع وصفوف إنتاج متوسطة.*

تساعد النسب المئوية للإستغلال التي إستخلصها كرامر (1990) من جداول الإنتاج عل معرفة كميات الإنتاج الناتجة من عمليات التخفيف في المدى المتوسط لمختلف حالات المشاجر. من الواجبات المهمة للبحوث التطبيقية في مجال الغابات توسيع هذه الطريقة في إتجاه يسمح بتقدير أصناف الأخشاب المنتجة والتنبؤ بتطور المشجر بعد كل عملية تخفيف (شلخ). هنالك مسألة بحثية أخري في مجال تخطيط الإسغلال، وهي وصف أنواع التخفيف التي يجب أن تتم في المستقبل ووضع تصور (تنبؤ) للوضع الإجتماعي للمشجر فيما يتعلق بالكثافة الشجرية وتركيبة المشجر والتغييرات التي تطرأ على قيمة المشاجر.

3.2.5. النماذج الرياضية للإنتاج

إن معظم النماذج الرياضية مستخلصة من جداول الإنتاج، وبذلك فإنها تحتوي هذه الجداول، لكن فقط في شكل آخر.
هنالك العديد من النماذج الرياضية التي تم تصميما لوصف النمو في الغابات.

تقدير الإنتاج بغابات الصنوبر (*Picea abies*) في روسيا

طور شفيدنكو وآخرون (1995) نماذج رياضية لعدد من الأنواع الشجرية في روسيا. المعادلة (7.5)، على سبيل المثال، تساعد على حساب الحجم في مشجر نموذجي (كامل الكثافة الشجرية) للنوع الشجري (*Picea abies*)، صف الإنتاج III في شمال روسيا.

$$V(t) = 205.3 \cdot \left[1 - e^{-0.0231 \cdot t}\right]^{2.93} \qquad (7.5)$$

حيث: $V_{(t)}$= الحجم النهائي بالمتر المكعب في الهكتار عند العمر (t).
بمساعدة المعادلة (7.5) يمكن تصميم جدول إنتاج (الجدول 3.5).

متوسط الصف العمري (بالسنوات)

	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190
متر^3/ هكتار	2.0	26.9	67.7	107.4	138.8	161.4	176.8	187.1	193.7	197.9

الجدول (3.5): جدول إنتاج لمشجر (Picea abies) كامل الكثافة الشجرية- صف إنتاج II في شمال روسيا.

تشكل مثل هذه النماذج الرياضية في العادة الأساس لتخطيط الإنتاج في منطقة غابية، عندما تكون صفوف الأعمار في هذه المنطقة معروفة. أن النموذج الرياضي لحساب الإنتاج ذي التراكمات العالية، (الثوابت الكثيرة تتيح فرصة سهلة نسبياً) لإختيار بدائل إستغلال مختلفة فيما يتعلق بالإستدامة، ولكن من المهم التفكير في أن تطور الغابة يمكن أن يختلف دائماً وفقاً لدرجة جودة الموقع والمعاملات الفلاحية.

نموذج موراي الرياضي لمتوسط الزيادة السنوية

في العادة يتم تصميم النموذج الرياضي لحساب الإنتاج الخشبي وفقاً لجودة المعادلة المستعملة ودرجة توافقها مع المعلومات المتاحة. إذا توفرت ظروف مشابهة للظروف التي جمعت فيها المعلومات الاصلية والتي صمم النموذج الرياضي على ضوئها، فإنه سيكون من الممكن إستخدام النموذج الرياضي للتنبؤ بالإنتاج المستقبلي. ستظل الحاجة لمثل هذا الأمر، مادامت هنالك طرق جديدة للمعاملات وظروف مواقع مجهولة وأنواع شجرية مختلفة.

من الأشياء المهمة جداً في تصميم نموذج رياضي لحساب القدرة الإنتاجية لمنطقة ما، معرفة متوسط الزيادة السنوية الكلية (MAI). هنا يمكن إستخدام العمر عن بلوغ متوسط الزيادة السنوية الى قمته ($DGZ(t_{max})$). من المعادلات المناسبة في هذا الصدد معادلة شابمان- ريتشارد:

$$V(t) = A\left(1 - e^{-k\{t-to\}}\right)^m \qquad (8.5)$$

حيث: $V_{(t)}$= حجم المخزون الخشبي بالمشجر (بالمتر المكعب في الهكتار) عند العمر (t)، (A)= مقياس يوضح القيمة االقصوى (تعرف بقيمة الإشباع) وتستعمل فيه نفس وحدات قياس $V_{(t)}$ أعلاه، و(k) يقسم المحور الزمني ويستعمل فيه مقلوب وحدة الزمن (إذا كانت وحدة الزمن المستعملة هي السنة، فإن وحدة (k) تساوي 1/ السنة). عبر التغيير في قيمة (k) في المعادلة (7.5) يمكن الحصول على النوذج الرياضي الذي يتناسب مع معدل النمو الحقيقي.

(t)= القيمة الزمنية التي يكون فيها الحجم أكبر من أو يساوي صفر، (m) تساعد على زيادة درجة المرونة فيما يتعلق بشكل منحنى النمو.

لكل من (A) و(k) و(t_0) و(m) مدى محدد للقيم عند المزاوجة بين القيم التجريبية للحجم والقيم الناجمة من نموذج النمو. إذا كان المطلوب عند التنبؤ هم لحجم عند العمر (t_{max})، هنا يكفي تحديد (t_0) على أساس الخبرة. في المزروعات الشجرية سريعة النمو مثلاً، فإن قيمة (t_0= 1) تعتبر دائماً قيمة معقولة. يعمل الثابت (A) على إتزان النموذج الرياضي وتحدد قيمته تلقائياً، مادامت القيم ذات الوزن (MAI_{max} و t_{max}) معروفة. هذا يعني أن شكل وإتجاه النموذج الرياضي للنمو في علاقته بمحور الزمن يتحدد فقط عبر الثوابت (m) و (k). في العادة يتم تعريف (t_{max}) عبر قيم (m) و(k). من هنا نخلص الى أن قيم الثوابت لا يمكن إستخدامها للنموذج الرياضي، إذا كانت قيمة (t_{max}) معروفة.

كان من الممكن أن يكون إعطاء قيمة (t_{max}) حلاً عملياً وذلك لأن قيم (t_{max}) و (MAI_{max}) تكون (في العادة) معروفة من خلال الخبرة كما يسهل الحصول عليها من خلال عمليات الحصر الغابي. يمكن الحصول على العلاقة بين (t_{max}) والثابتين (k) و(m) عند إجراء عملية التفاضل للنموذج أعلاه.

$$1 = \left[1 + t_{max} \cdot m \cdot k\right] \cdot e^{-k\cdot\{t-1\}} \qquad (9.5)$$

إذا أعطيت قيم (m) فيمكن الحصول على قيمة (k). أستعمل موراي وقادو (1993) برنامجاً حاسوبياً لحساب قيمة (k).

متوسط الزيادة السنوية النسبي

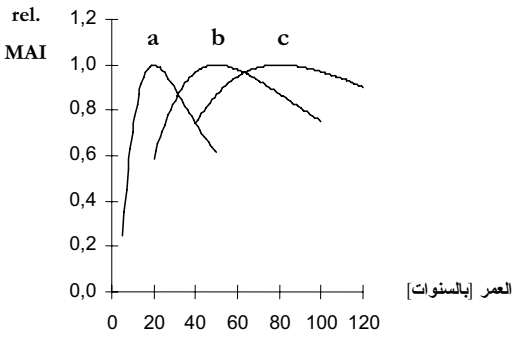
أن القيم الاساسية التي يعتمد عليها النموذج الرياضي لمنطقة ما هي القيم التي يمكن الحصول عليها من الخبرة العملية لكل من (t_{max}) و (MAI_{max}). في مثل هذه الحالة ينصح بإستعمال متوسط الزيادة السنوية النسبي ($reIMAI_{(t)}$) ويتم تعريفه كالآتي:

MAI_{max} =1

يمكن الحصول على متوسط الزيادة السنوية النسبي في الهكتار في السنة عن طريق المعادلة الآتية:

$$reIMAI(t) = \frac{t_{max}}{t} \frac{\left(1 - e^{-k\{t-to\}}\right)^m}{\left(1 - e^{-k\{t_{max}-to\}}\right)^m} \qquad (10.5)$$

الشكل (7.5) يوضح أمثلة لمتوسط الزيادة السنوية النسبي ($reIMAI_{(t)}$) والتي تبلغ قيمتها عند (t_{max})= 20، 50، 80 سنة.



الشكل (7.5): ثلاثة منحنيات لمتوسط الزيادة السنوية النسبي.

يتم الحصول على منحنيات متوسط الزيادة السنوية عن طريق ضرب القيم النسبية في قيمة (MAI_{max}) التي تكون معروفة القيمة.

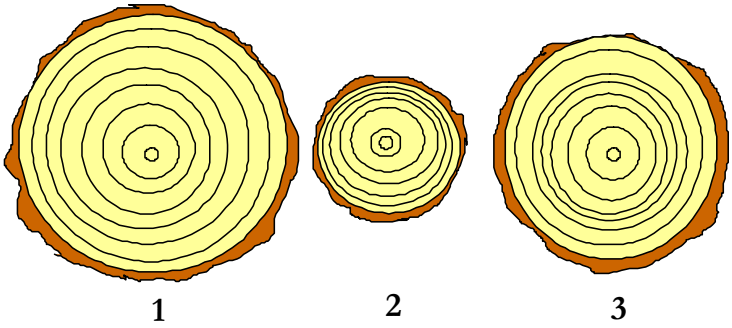
وجد موراي وقادو تطابقاً جيداً بين النموذج الرياضي التحليلي لمتوسط الزيادة السنوية النسبي والنماذج الرياضية التجريبية للنمو. إذن يمكن في حالة وجود معلومات عن القيمة القصوى لمتوسط الزيادة السنوية والعمر النهائي الحصول على نتائج أفضل من تلك التي يتم حسابها عن طريق النماذج الرياضية للنمو والتي تعتمد عادة على معلومات غير مكتملة.

3.5. النماذج الرياضية للمشاجر التي تعمد على الكثافة الشجرية

من الأهداف الحالية لبحوث نمو الغابات تصميم نماذج رياضية تسمح بتقييم مختلف العمليات الفلاحية في الغابة. لقد ثبت أن جداول الإنتاج والنماذج الرياضية للنمو في مناطق واسعة غير مؤهلة لذلك، لأنهما يعملان لحساب النمو والإنتاج في مشاجر أنشأت ويتم تحقيقها وفقاً لمنهج معين (وضع مثالي). تزيد الإصلاحات اللازمة لجدول الإنتاج تعقيداً، كلما تنوعت الأنشطة الفلاحية (التخفيف بشكل خاص) بالقدر الذي يجعلها منحرفة عن جدول الإنتاج.

العلاقة بين كثافة المشجر والنمو

أوضحت عدة تجارب أن نمو الإرتفاع لا يتأثر بكثافة المشجر، في حين أن نمو القطر شديد الحساسية لدرجة كثافة المشجر. تنتمي أعمال كريب (1939) الى التجارب الأولى التي توضح حساسية تفاعل القطر مع مختلف المعاملات الفلاحية في المشجر. الشكل (8.5) يوضح ثلاثة قطاعات عريضة لأشجار صنوبر متساوية في عمرها.



الشكل(8.5): قطاعات عريضة لثلاثة شجرات أخذت عند مستوى الصدر، عمر كل منها 9سنوات.

نمت الشجرة (1) في مساحة خالية من المنافسة والشجرة (2) نمت في مشجر مكتظ بالأشجار، أما الشجرة (3) فقد نمت في البداية في مشجر مكتظ بالأشجار ثم إستجابت (بإرتفاع) في زيادة القطر بعد عملية تخفيف مكثف أجريت في عمر 7 سنوات.

من البحوث الأساسية في العلاقة بين الكثافة الشجرية والنمو إسهامات آسمان (1961)، خصوصاً فكرة المساحة القاعدية المثلى (Optimum). توصل آسمان ومن بعده توماسيوس (1963) الى أن أعلى زيادة في المخزون الخشبي تتحقق عندما تكون الكثافة الشجرية أقل بقليل من الكثافة القصوى. ما عادت هذه الفكرة مقبولة اليوم، وذلك لأن الكثافة العالية للمشجر تؤدي بالفعل الى زيادة في حجم المخزون الخشبي (في وحدة المساحة) ولكن على حساب إستقرار المشجر. عرفت هذه الحقيقة مبكراً في المزروعات الشجرية الغابية. كنتيجة للكميات الكبيرة من الخسائر (نتيجة عدم إستقرار المشاجر) فقد ظلت تمارس عمليات تخفيف مكثفة في المزروعات الشجرية منذ حوالي 60 عاماً وذلك نظراً للتأثير الإيجابي لهذه العمليات على إستقرار الغابة وزيادة سرعة نمو الأشجار مما يرفع من قيمة الأشجار المفردة داخل المشجر.

أمثلة لنماذج رياضية للمشاجر ذات الكثافات الشجرية المتعددة

لا يقتصر الفرق الأساسي بين النموذج الرياضي المعتمد على كثافة المشجر وجدول الإنتاج المثالي في نوع العرض الذي يقدمه كل. يمكن عرض جدول الإنتاج المثالي أيضاً عن طريق برنامج حاسوبي، ولكن هذا العرض لا يضيف اي معلومات جديدة. إن الفرق بين النماذج الرياضية المعتمدة على كثافات شجرة متعددة للمشاجر وبين جداول الإنتاج المثالية يكمن في الفكرة من اساسها. لا يمكن بناء النموذج الرياضي لبدائل متنوعة لإدارة غابة على منهج واحد فقط من مناهج التدخل الفلاحي (بالقطع أو التخفيف). إن مثل هذا النموذج الرياضي، لما له من تصميم خاص، يعمل على تقييم معاملات فلاحية مختلفة للمشجر الغابي. يتم تصميم بدائل حاسوبية عديدة ويتم تجريبها بالتتالي حتى يتم الحصول على صورة تطابق أو تشابه المشجر الحقيقي ويتم ما يعرف ببرامج الحساب المتتالي أو المتواتر. (Simulation programms).

تعتمد جودة النموذج الرياضي البيولوجي على صلاحية التعميم ودرجة الدقة. عند تطوير نماذج رياضية للنمو والإنتاج يراعى صلاحيتها لتغطية مدى واسع كما تراعى درجة دقتها عند التطبيق. هذا يعني أن المطلوب هو الحصول على نموذج رياضي يتناسب مع المعلومات المتوفرة. يؤدي السعي لتحقيق هذا الهدف الى البحث الدائم عن نماذج رياضية تتناسب مع كل حالة بشكل جيد، ولكن لعدم توفر صلاحية التعميم وأمكانية الإستخدام على مدى واسع يصرف النظر (في كثير من الأحيان) عن إستخدام مثل هذه النماذج.

نظراً لتعقيد ديناميكية الغابات المختلطة والعدد الكبير من أنواع المشاجر سوف يكون في نهاية الأمر النموذج الرياضي للشجرة المفردة (Single tree model) هو الحل الأمثل. مع هذا فهنالك حاجة ماسة لنماذج رياضية مرنة، تعتمد على كثافات شجرية مختلفة تغطي فترة زمنية محددة وذلك بهدف التخطي الغابي.

يحتاج التخطيط الغابي الى نماذج رياضية للنمو موثوق بها. لتحقيق هذا الهدف فإنه من الممكن إستعمال أسهل أنواع النماذج الرياضية لحساب التطور المستقبلي لمكونات المشاجر الحقيقية، الشرط للقيام بذلك هو تقسيم المعلومات الخاصة بالحصر والعمليات الفلاحية الى أنواع ودرجات. يجب أن يكون النموذج الرياضي قادراً على الإستجابة لمختلف الحالات التي تكون عليها المشاجر ومختلف المعاملات الفلاحية، ويكون من الأفضل إذا أمكن حساب المنتجات الخشبية في شكل أصناف.

من قيم المشجر المهمة التي يجب أخذها في الحسبان: الإرتفاع وعدد الأشجار والمساحة القاعدية (في المشاجر المختلطة يجب التقسيم حسب الأنواع الشجرية الموجودة) وكذلك الأنواع الشجرية ودرجة وزمن عمليات التخفيف (المخططة). يستفاد من النموذج الرياضي للمشجر في وصف تطور المتوسطات (مثل القطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية، الإرتفاع السائد للمشجر والمتغيرات المرتبطة بوحدات المساحة: مثل عدد الأشجار والمساحة القاعدية في الهكتار).

لحساب تطور المشجر في المدى القصير والمتوسط، فإن المعادلة الجبرية ذات الثلاث ثوابت، التي إقترحها شابمان وريتشارد، تعتبر مناسبة.

$$H = a_0 \cdot \left[1 - e^{-a_1 \cdot t}\right]^{a_2} \qquad (11.5)$$

حيث: ان (H) تشير الى إرتفاع المشجر، و(t) الى عمر المشجر و(α_0) إلى ثابت يحمل نفس وحدات القياس التي يحملها المتغير غير المستقل ويعمل الثابت (α_1) على تقسيم محور الزمن، في حين أن (α_1) و(α_2) معاً يحددان شكل منحنى النمو (أي موضعه بالنسبة إلى محور الزمن).

إبتداء من الإرتفاع (H_1) في العمر (t_1) يمكن تحديد الإرتفاع (H_2) في العمر (t_2) وفقاً للمعادلة الآتية:

$$H_2 = H_1 \cdot \left[\frac{1 - e^{-a_1 \cdot t_2}}{1 - e^{-a_1 \cdot t_1}}\right]^{a_2} \qquad (12.5)$$

يمكن عن طريق معادلة شابمان– ريتشارد حساب التطور لنمو الإرتفاع دون الحاجة لتحديد مؤشر الموقع ولا يهم في هذا النموذج الرياضي إذا كانت الفترة الزمنية التي يغطيها التنبؤ مقسمة الى وحدات زمنية أقصر أم لا: مختلف الفترات الزمنية تؤدي الى نفس النتيجة. يمكن تحديد (حساب)ثوابت الإرتفاع بإستخدام تحليل الإنحدار غير الخطي لكل نوع شجري عن طريق جداول الإنتاج. بتحليل جدول إنتاج شوبر (1995) أمكن حساب الثوابت الآتية من متوسطات الإرتفاعات لكل من النوعين (*Picea abies*) و (*Fagus sylvatica*).

الثابت	*Picea abies*	*Fagus sylvatica*
α_1	0.02140	0.02001
α_2	1.7831	2.0272

يحتوي هذا النموذج إذن على جدول إنتاج ولكن في شكل آخر.

إذا دعت الضرورة (لأي سبب كان) إلى حساب درجات جودة الموقع (مؤشر الموقع) فإنه يمكن تحديد درجة جودة الموقع المطلق بإستخدام الإرتفاع عن طريق المعادلة (12.5)، كما يمكن رسم منحنيات الإرتفاع (التي يتم حسابها) بيانياً. بما أن ثوابت النموذج الرياضي لكل صفوف الإنتاج متساوية، فإننا سنحصل على نظام منحنيات أحادي المسار (Anamorphic). إذا إتضح من خلال المعلومات المتوفرة ان التناسب بين منحنيات الإرتفاع غير صحيح فإنه يمكن تحويل الإتجاه الأحادي للنموذج الرياضي للإرتفاع إلى نموذج متعدد الإتجاهات (Polymorphic) بدون عناء.

بنفس الطريقة يمكن وزن النموذج الرياضي ليناسب جدول الإنتاج بإستخدام درجة كثافة المشجر، إذا تم حساب المساحة القاعدية في العمر (t_2) بإعتبارها دالة على (أو مرتبطة ب) المساحة القاعدية في العمر (t_1). يمكن بنفس الطريقة حساب المساحة القاعدية المستقبلية عن طريق المعادلة الجبرية التي تعتمد على الفرق في المساحة القاعدية الحالية، حيث أن مستوى الإنتاج موجود ضمن المعلومات الحقيقية للمشجر وبذلك فهو ايضاً موجود (تلقائياً) في التنبؤ المستقبلي. إستعمل بينار (1990) المعادلة (15.4) لحساب المساحة القاعدية في مشجر صنوبر (*Picea abies*) وهى تعتمد على الفرق الجبري للنموذج الرياضي لتطور المساحة القاعدية. إعتمدت المعادلة على معلومات من جدول الإنتاج الذي صممه فيدامان وشوبر، وبالتالي فإنها تصلح فقط في حدود درجات المعاملات الفلاحية التي بني عليها جدول الإنتاج المذكور.

$$\ln(G_2) = \ln(G_1) - 276.84\left(\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1}\right) + 0.52\left[\ln(H_2) - \ln(H_1)\right] + 6.99\left[\frac{\ln(H_2)}{t_2} - \frac{\ln(H_1)}{t_1}\right] + 28.96\left[\frac{\ln(N_2)}{t_2} - \frac{\ln(N_1)}{t_1}\right] - 0.09\left[\frac{N_{Df}\, t_{Df}}{Nt_2} - \frac{N_{Df}\, t_{Df}}{Nt_1}\right] \quad (13.5)$$

حيث:

t_2, t_1 = عمر المشجر في بداية ونهاية فترة التطور

G_2, G_1 = المساحة القاعدية للمشجر (متر مربع في الهكتار) في العمر t_1 و t_2

H_2, H_1 = متوسط إرتفاع المشجر (بالمتر) في العمر t_1 و t_2

N_2, N_1 = عدد الأشجار في الهكتار في العمر t_1 و t_2

t_{Df} = عمر المشجر عند النقطة الزمنية التي تحدث عندها عملية التخفيف

N_{Df} = عدد الأشجار التي تقع في عملية التخفيف عند النقطة الزمنية t_{Df}

N = عدد الأشجار قبل عملية التخفيف (أي عدد الأشجار في بداية الفترة) في الهكتار

مثال: في عملية حصر غابي وجد أن المساحة القاعدية لمشجر صنوبر *(Picea abies)* في عمر 60 سنة يساوي 39متراً مربعاً في الهكتار. بلغ متوسط الإرتفاع للمشجر=20.5 متراً وعدد الأشجار 1276 شجرة في الهكتار. في عمر66 سنة يجب قطع 278 شجرة في إطار عملية تخفيف. الإرتفاع المتوقع في عمر 70 سنة يساوي 23.3 متراً (هذا يعني أن هذا المشجر من صف الإنتاج IIوفقاً لجدول إنتاج فيدامان وشوبر). بتطبيق المعادلة (13.5). يمكن حساب المساحة القاعدية في عمر 70 سنة (تساوي 41.8 متراً مربعاً في الهكتار).

هنالك أهمية خاصة للنماذج الرياضية للنمو (المتعلقة بتقدير أحجام وقيم المشاجر الغابية) التي تهتم بتقديرات الأقطار والمساحات القاعدية لمختلف الكثافات الشجرية. مثل هذه النماذج لا تساعد فقط على إعطاء تقديرات للتطور لحالة محددة، وإنما تسمح ايضاً بإعطاء معلومات عن العلاقة بين الزيادة في المساحة القاعدية وكثافة المشجر والإرتفاع السائد. كمثال لذلك فقد طور هوي وقادو (1993) نموذجاً رياضياً مبسطاً للمساحة القاعدية للنوع الشجري *(Cunninghamia lanceolata)* وهي من الأشجار الإقتصادية المهمة في الصين. تقرا المعادلة كالآتي:

$$G_2 = G_1 N_2^{1-0.142\cdot H_2^{0.601}} N_1^{0.142\cdot H_1^{0.601}-1}\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^{4.292} \quad (14.5)$$

حيث:

G_2, G_1 = المساحة القاعدية بالمتر المربع في الهكتار في العمر t_1 و t_2 على الترتيب

N_2, N_1 = عدد الإشجار في الهكتار في العمر t_1 و t_2 على الترتيب

H_2, H_1 = الإرتفاع السائد في العمر t_1 و t_2 على الترتيب

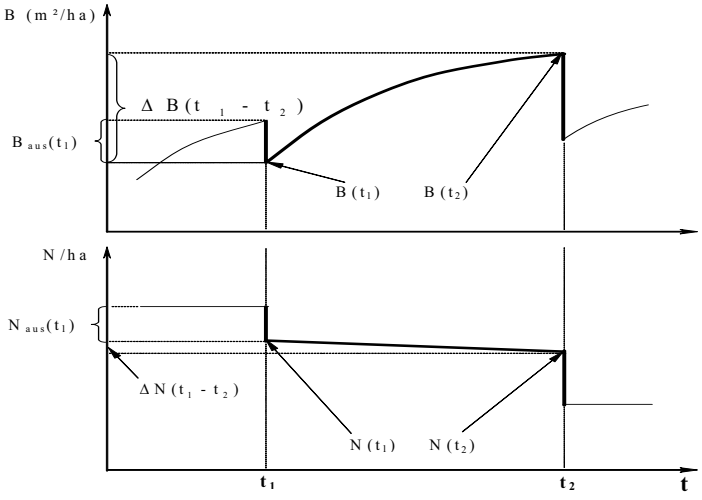
يمكن إستعمال المعادلة (14.5) وإختيار قيم مناسبة للثوابت لحساب التطور الحقيقي للمساحات القاعدية بالمشاجر. من الواضح أن إستخدام المعادلة ليس بالأمر العسير.

مثال: في إطار حصر غابي تم الحصول على القيم الخاصة بمشجر ما عمره 16 عاما. بلغت المساحة القاعدية 42.4 متراً مربعاً في الهكتار والإرتفاع السائد 14.5 متراً وعدد الأشجار 2370 شجرة في الهكتار. حسب الخطة يجب عدم قطع أي أشجار حتى العمر 21، من المتوقع موت 30 شجرة موتاً طبيعياً. الإرتفاع المتوقع في عمر 21 سنة يقدر ب 17 متر وعدد الأشجار في هذا العمر (إذن) يساوي 2340 في الهكتار. المساحة القاعدية المتوقعة عند إستعمال المعادلة (14.5) في عمر 21 سنة تساوي 50.3 متراً مربعاً.

يساعد هذا النموذج الرياضي (المعادلة 14.5) على التنبؤ بتطور المساحة القاعدية، إذا توفرت المعلومات عن الإرتفاع السائد وعدد الأشجار. من المهم عند تطبيق النموذج الرياضي وجود معادلة جبرية تناسبه وبذلك يمكن حساب تطور المساحة القاعدية (أي التنبؤ بما ستصير إليه مستقبلاً).

1.3.5. نموذج نمو لمشاجر الصنوبر (Picea abies)

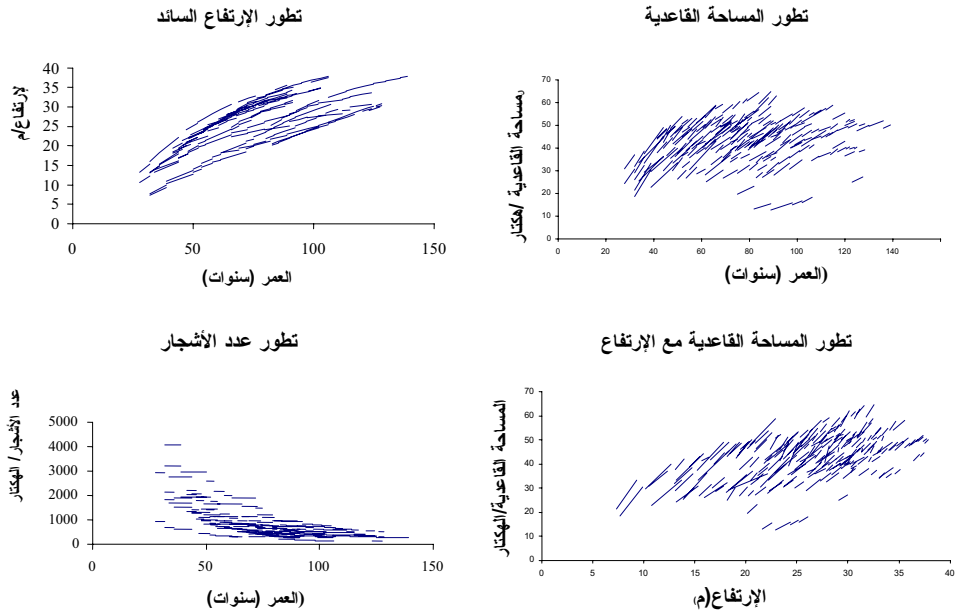
الشكل (9.5) يوضح الطريقتين الأساسيتين اللتين يتحدد بموجبهما تور المساحة القاعدية، وتحديداً: النمو الطبيعي بين عمليتي تخفيف (شلخ) والتغيير الذي يحدث بعد كل عملية تخفيف.



الشكل (9.5): رسم توضيحي للعلاقة بين النمو والقطع في مشجر.

(B)= المساحة القاعدية/ الهكتار، (B_{aus})= الجزء من المساحة القاعدية الذي قطع في عملية التخفيف، $B(t_1)$و $B(t_2)$= المساحة القاعدية في الأعمار (t_2, t_1)، $\Delta B(t_1-t_2)$ = الزيادة في المساحة القاعدية عبر عملية النمو، (N)= عدد الأشجار في الهكتارن N_{aus}= عدد الأشجار التي قطعت في عملية التخفيف، $N(t_1)$و $N(t_2)$= عدد الأشجار في العمر (t_1) و(t_2) في الهكتار، $\Delta N (t_1-t_2)$ = النقص في عدد الأشجار نتيجة للموت الطبيعي.

لتحديد ثوابت النماذج الرياضية إستعمل كورجانوف وآخرون (2000) معلومات متوفرة عن 19 مربوع عينة للنوع الشجري *(Picea abies)*. بلغ العدد لفترات القياسات 228 وتوفرت معلومات عن العمر والإرتفاع وعدد الأشجار، الشكل (10.5) يوضح تطور كل من الإرتفاعات وعدد الأشجار والمساحات القاعدية مع العمر بالإضافة إلى تطور المساحة القاعدية مع الإرتفاع.



الشكل (10.5): العرض البياني ل19 مربوع عينة وفترات القياسات.

يمكن تقسيم النماذج الرياضية الخاصة بالمساحات القاعدية للمشاجر إلى نوعين

1. النماذج الرياضية التي تعتمد على الفروقات الجبرية عند حساب المساحة القاعدية في العمر (A_2).
2. معادلات التفاضل لحساب الزيادة السنوية في المساحة القاعدية.

من خلال إسهامات كورجانوف وآخرون (2000) تم عن طريق إستعمال النوع الأول أعلاه تطوير نماذج رياضية للنوع الشجري (*Picea abies*) متساوية الأعمار وقد خضعت لعمليات تخفيف (شلخ). بناءاً على دراسات مكثفة تم التوصل في نهاية الأمر إلى نموذج لهذه المشلجر. الجدول (4.5) يبين العناصر الأساسية لهذا النموذج الرياضي.

المساحة القاعدية	$B2_2 = exp\left(\left(\frac{A_1}{A_2}\right)\cdot lnG_1 + 5.5357\cdot\left(1-\frac{A_1}{A_2}\right)-0.0112\cdot SI\cdot\left(1-\frac{A_1}{A_2}\right)+-0.00681\cdot\left(lnN_2-\left(\frac{A_1}{A_2}\right)\right.\right.$
الإرتفاع السائد	$H = SI\cdot\left(\frac{1-exp(-0.0006\cdot SI\cdot A)}{1-exp(-0.0006\cdot 100\cdot A)}\right)^{1.507}$
الإرتفاع المتوسط	$H_m = 0.5981\cdot H^{1.1206}$
معامل الشكل	$FH = -4.258 + 0.9401\cdot(H_m) - 0.01063\cdot(H_m{}^2)$
حجم المخزون الخشبي بالمشجر	$V = G\cdot FH$
الموت الطبيعي للأشجار	$N_2 = 1000\cdot\left[\left(\frac{N_1}{1000}\right)^{-0.618365} + 0.000264\cdot(H_2^{2.341983} - H_1^{2.341983})\right]^{\frac{1}{-0.618365}}$

الجدول(4.5): نموذج نمو للنوع الشجري (picea abies) لمشاجر متساوية العمر تم تطويره على اساس بحوث كورجانوف (2000) وسانشيز (2001) وفيلكو (2002).

حيث: (A) = عمر المشجر، (SI) = مؤشر الموقع (العمر المرجعي =100 سنة)، (B) = المساحة القاعدية (متر مربع/ الهكتار)، (N) = عدد الأشجار في الهكتار، (H) =الإرتفاع السائد (متر)، (H_m) =الإرتفاع المتوسط (متر)، (FH)= مضروب معامل الشكل في الإرتفاع (متر)، (V) = حجم المخزون الخشبي بالمشجر (متر مكعب في الهكتار).

يعمل نموذج النمو في الجدول أعلاه على حساب المساحة القاعدية وعدد الأشجار الموجودة (الحية) والإرتفاع بالمشجر بناءاً على المعلومات الأساسية المتوفرة. يعتبر مثل هذا النموذج الرياضي (المشجر) مناسباً جداً (على عكس النماذج الرياضية للأشجار المفردة)، وذلك لقدرته على حساب خيارات متعددة للعمليات الفلاحية (تحيداً عمليات التخفيف). من المحتمل أيضاً أن يكون النموذج الرياضي للمشجر أكثر دقة، مقارناً بالنماذج الرياضية للأشجار المفردة.

2.3.5. حجم وتصنيف المخزون الخشبي بالمشجر

من المعروف أن حجم المخزون الخشبي الواقف ليس قيمة حصر أصلية، وإنما قيمة مستخلصة من عمليات حسابية ويتم الحصول عليه كناتج ضرب لثلاثة متغيرات هي المساحة القاعدية وعدد الأشجار والإرتفاع ويمكن حساب الحجم أيضاً عن طريق المساحة القاعدية ومضروب الإرتفاع في معامل الشكل. بهذا يمكن إعتبار الحجم محصلة لعمليات الحصر. لهذا السبب فإنه من المهم جداً الحصول على معلومات عالية الدقة عن المتغيرات الأصلية وهي المساحة القاعدية وعدد الأشجار والإرتفاع. تعتبر معرفة الحجم وتصنيفه إلى أنواع أمراً مهماً لاتخاذ القرارات المتعلقة بإدارة الغابات، لهذا فإنه ينصح بتطوير طريقة ليس فقط سهلة، وإنما أيضاً صالحة للتطبيق في كل مكان. يمكن أن يتم التعبير عن ذلك بالآتي: إيجاد أسهل نموذج رياضي يساعد على التعبير عن كل جداول الأصناف بدرجة محددة من الدقة. قام أماتيز وآخرون (1986) بتطوير معادلة تناسب حجمية تعمل على حساب الإنتاج من كل صنف بإستعمال أقل قطر يحقق حجم الصنف المعين (V_m).

$$V_{m,d} = V\left[e^{\gamma_1\left(\frac{m}{D}\right)^{\gamma 2}+\gamma_3\left(\frac{d}{D}\right)^{\gamma 4}}\right] \qquad (15.5)$$

حيث:

V = حجم المخزون الخشبي الواقف بالمشجر.

D = القطر المحسوب عن طريق المساحة القاعدية للشجرة الوسطية.

D = أقل قطر في المشجر تحقق به إنتاجية للصنف من أقل متوسط قطر (m).

البرنامج الحاسوبي أدناه (Prodvol) يوضح حساب الجزء من الحجم في الدرجة 2 (20– 30 سم كمتوسط قطر) لمشجر صنوبر (*Picea abies*)، القطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية= 34سم.

```
Program ProdVol;
Var p1, p2: real;

Function Potenz(x, a: real): real;
Begin Potenz:=exp(a*ln(x)) End; {Potenz}

Function P(Dg,{mittl. D des Grundfl Mittelst.}
            m, {Mindest-Mittendm. des Sortiments}
            d  {geringster mittl. D, bei dem noch
                Sortimenterträge mit m anfallen}
           :real): real;
Const g1=-1.311; g2=2.877; g3=-0.1019; g4=0.8377;
Begin
  P:=exp(g1*potenz(m/Dg,g2)+g3*potenz(d/Dg,g4));
End; {P}

BEGIN
  {Beispiel für Klasse 2}
  p1:=P(34,20,14);
  p2:=P(34,30,20);
  write('Der Anteil der Klasse 2 (20-30cm)');
  write(' am Gesamtvolumen beträgt ');
  writeln(100*(p1-p2):5:1,' Prozent');
  readln
END.
```

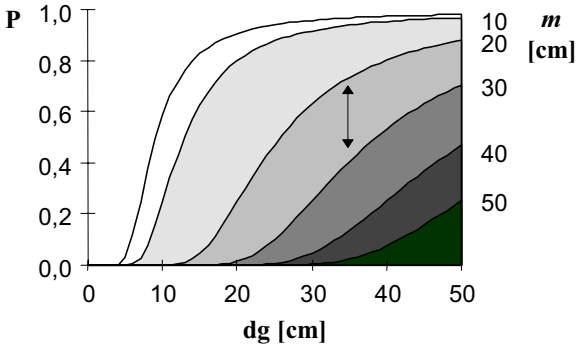
مثال: في بحث محلي يتعلق بتصنيف إنتاج مشجر صنوبر (*Picea abies*) تم الحصول على الثوابت $\gamma_1 = -1.311$، $\gamma_2 = -2.877$، $\gamma_3 = 0.1019$، $\gamma_4 = 0.8377$. يجب إستعمال المعادلة (15.5) لحساب الإنتاج من الدرجة الثانية ($m \leq 30 \leq 20$) في مشجر سيخضع لعملية تخفيف. الحجم الناتج من عملية التخفيف= 60 متر مكعب للهكتار والقطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية لعملية التخفيف= 34سم، ينتج من ذلك.

$V_{20, 14}$ = 0.72* 60= 43.2 متراً مكعباً/ الهكتار.
$V_{30, 20}$ = 0.38* 60= 22.8 متراً مكعباً/ الهكتار.
الكمية من إنتاج التخفيف التي تقع في الدرجة الثانية = 43.2– 20.8= 20.4 متراً مكعباً/ الهكتار.

تصلح المعادلة (15.5) لحساب الأصناف الخشبية في المشاجر وكذلك بالنسبة للأشجار المفردة. إذن يجب أن يكون لكل نوع شجري مجموعتان من الثوابت: واحدة للأستعمال في حالة النماذج الرياضية للأشجار المفردة واخرى للأستعمال في النماذج الرياضية للمشاجر. في العادة يمكن حساب القطر الأدنى (d) من متوسط القطر (m) عن طريق تحليل الإنحدار البسيط. لحساب أحجام الأصناف في حالة وجود القيم الأدنى لمتوسطات أقطارها (m) يمكن أيضاً إستعمال مجموعة المنحنيات المرسومة بيانياً (الشكل 12.5). يمكن حساب مقدار (d) من المعادلة:

$$d = 0.832 + 0.6688m$$

يمكن الحصول على الجزء الذي يمثله صنف محدد من الفرق بين قيم منحنيين كما في الشكل (15.5).



الشكل (12.5): الجزء P من الصنف بأقل متوسط قطر (m) من الحجم الكلي (إعتمادا على معلومات عن النوع الشجري spruce في سكسونيا السفلى عام 1978– 1984)(الجزء من الدرجة الثانية لمشجر فيه d_g= 34 سم يمكن حسابه من السهم ذي الرأسين في الشكل.

من مكونات النموذج الرياضي للنمو، أخيراً، تحديد كمية ونوع ودرجة التخفيف، على سبيل المثال يمكن إيجاد النسبة بين المساحة القاعدية التي أزيلت في عملية التخفيف والمساحة القاعدية قبل الخفيف من جدول الإنتاج.

$$\frac{G_t}{G} = \left(\frac{N_t}{N}\right)^{\delta} \qquad (16.5)$$

حيث:

G = المساحة القاعدية قبل التخفيف (بالمتر المربع/ الهكتار)

G_t = المساحة القاعدية الناتجة من التخفيف (بالمتر المربع/ الهكتار)

N = عدد الأشجار قبل التخفيف (في الهكتار)

N_t = عدد الأشجار الناتجة من عملية التخفيف (في الهكتار)

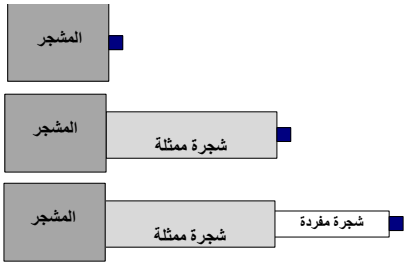
δ = ثابت، تحدد قيمته وفقاً لدرجة التخفيف

نتج من تحليل جدول إنتاج النوع الشجري (*Picea abies*) الذي صممه فيدمان وشوبر قيمة δ =1.42 للتخفيف المتوسط و1.25 للتخفيف المكثف (الثقيل).

تسمح العناصر التي تم وصفها للنموذج الرياضي للنمو وللأنتاج بحساب تطور المشجر الغابي وحساب الإنتاج وفقاً للأصناف لمختلف المراحل (إنطلاقاً من أي حالة إبتدائية) ولمختلف أنواع التخفيف. من المحاسن الأساسية لطريقة الفروقات الجبرية أنها أسهل بكثير من الطرق الأخري، هذا بالإضافة إلى طريقة الفروقات الجبرية لمعدلات النمو أكثر صحة من الناحية النظرية من معادلات التفاضل، مما يجعلها أسهل في التطبيق.

6. نمو الأشجار المفردة

هنالك شرطان أساسيان لتصميم النماذج الرياضية للنمو والإنتاج، أولهما إستيفاء إحتياجات نظرية محددة وثانيهما أن يعود التطبيق بقيمة فيما يتعلق بمسألة التطور. إن إستيفاء هذان الشرطان ليس بالإمر السهل، إذا إخذنا في الحسبان أن هذه النماذج الرياضية يجب أن تساعد في حساب مدى واسع من درجات جودة الموقع وأنواع مختلفة من المعاملات الفلاحية. يجب أن يتوافق نوع النموذج الرياضي المستعمل مع المعلومات المتاحة، فمثلاً إذا توفرت معلومات عن شجرة (بما في ذلك الموضع المحد لتلك الشجرة داخل المشجر)، فإنه من الممكن الإستفادة من هذه المعلومة المتوفرة، وذلك من خلال إستعمال نموذج رياضي للشجرة المفردة معتمداً عل موضع الشجرة. كلما زادت المعلومات المتوفرة، كلما كانت الرؤية أكثر وضوحاً. الشكل (1.6) يوضح درجات الحصول على المعلومات: عن طريق المشجر بشكل عام، ثم عن الشجرة وشجرة ممثلة، ثم عن المشجر وشجرة ممثلة والأشجار المفردة.

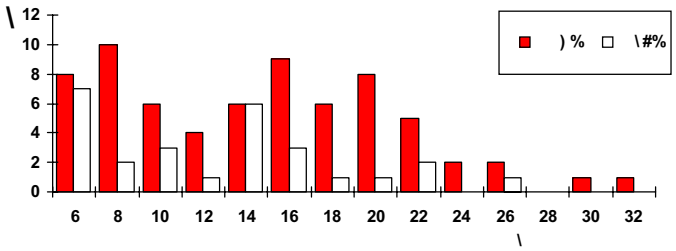


الشكل (1.6): تكامل النماذج لرياضية بأنواعها المختلفة على أساس القاعدة التلسكوبية.

تعتمد درجة تفاصيل الملومات الناتجة من النموذج الرياضي على درجة تفاصيل ودقة المعلومات الأولية المتوفرة. هنالك نوعان من النماذج الرياضية لمعرفة (أو حساب) نمو الشجرة المفردة. يمكن إستخدام النماذج الرياضية للشجرة المثلة (Representative tree) أي الشجرة المتوسطة في المشجر، إذا توفرت معلومات عن توزيع الأقطار (Diameter distribution)، أما إذا أتيحت، علاوة على ذلك معلومات عن مواضع الأشجار داخل المشجر (أحداثيات كل شجرة)، فإنه يمكن إستعمال ما يعرف بالنماذج الرياضية للأشجار المفردة إعتماداً على الموضع.

1.6 النماذج الرياضية التي لا تعتمد على الموضع

في حالة النماذج الرياضية للشجرة الممثلة (أي الشجرة الوسطية في المشجر) لا تعرف إحداثيات الأشجار داخل المشجر، لذا يسمى هذا لنوع بالنماذج الرياضية غير المعتمدة على تحديد الموضع. في هذا النوع يتم تمثيل الأشجار المتشابهة بشجرة واحدة. في التوزيع القطري على سبيل المثال يتم تحديد عدد معين من الأشجار ويمثل بشجرة واحدة يمثل قطرها متوسط الصف القطري المعين. الشكل (2.6) يعطي مثالاً لتوزيع الأقطار في غابة مختلطة من أشجار ال (*Fagus sylvatica*) و(*Psedotsuga menziesii*).



الشكل (2.6): التوزيع القطري لمشجر مختلط من النوعين (Fagus sylvatica) و(Psedotsuga menziesii) وقد أخذ من دي وال (1995) (ن= العدد، ص= متوسطات صفوف الأقطار).

هنالك خمسة طرق مختلفة لهذا النوع من النماذج الرياضية (كلها تتم عن طريق التوزيعات التكرارية) وهي:
1). التنبؤ بالتوزيعات القطرية المستقبلية.
2). الطريقة المبسطة لحساب التوزيعات القطرية.
3). التغيير في المساحات القاعدية النسبية.
4). النماذج الرياضية الإنتقالية.
5). الحساب المباشر للزيادة.
في الغابات التطبيقية يندر وجود معلومات عن موضع كل شجرة، أما المعلومات المتعلقة بالتوزيعات القطرية فإنها تكون متاحة دائماً ويمكن على أقطار الأشجار خلال أي عملية حصر غابي. من هنا نجد أن النماذج الرياضية للأشجار الممثلة تلعب دوراً أساسياً في البحوث التطبيقية في مجال نمو الغابات.

1.1.6 حساب تطور التوزيعات القطرية

ان القطر عند إرتفاع مستوى الصدر متغير كثير الإستعمال في مجال الغابات وهو شديد الإرتباط بحجم وقيمة الشجرة، ومن هذا المنطلق فإنه يشكل واحد من أهم الأسس لإتخاذ القرارات الفلاحية في الغابات، لهذا فإن المعلومات عن توزيع الأقطار، والتي يمكن تضمينها في حساب التطور المستقبلي للغابة، تعتبر قيمة جداً يضاف إلى ذلك سهولة الحصول عليها. بالإضافة للوصف الإحصائي للتوزيعات القطرية فإن التنبؤ بتطور المشجر عن طريق المعادلات التوزيعية من الطرق المفضلة في مجال بحوث الغابات، وهنا سيتم تحديد مختلف ثوابت جودة الموقع والمعاملات الفلاحية وتأثيرها على التوزيعات القطرية. في خطوة أخرى يتم تحديد العلاقات بين ثوابت التوزيع وبعض صفات المشجر. يمكن شرح هذه الطريقة في مثال (معادلة ويبل).

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} \qquad (6.1)$$

حيث:

X = أي قطر عند إرتفاع مستوى الصدر (يتم إختياره عشوائياً).
X = قطر يتم حسابه عن طريق قانون الإحتمالات على أن يكون أصغر من (X).
F(x) = المجموع التراكمي المحسوب عند توزيع ويبل بناءاً على المتغير (X= إحتمال أن يكون القطر الذي يتم حسابه أصغر من x).
a,b,c = ثوابت الموضع ومقياس الرسم والشكل.

كان سمالي وبايلي من أوائل من استعمل طريقة تحديد الثوابت، وكانت المعادلات التي أستعملاها لتحديد معادلة ويبل كالآتي:

$$a = \begin{cases} -1.9492 + 0.0757 \cdot H, & H \leq 26 \ feet \\ 0, & H > 26 \ feet \end{cases} \qquad (2.6)$$

$$b = -a - 5.2352 - 0.0003 \cdot N + 1.1955 (10)^3/N + 6.2046 \log_{10}(H) \qquad (3.6)$$

$$c = 6.0560 - 0.0391 \cdot H - 0.0006 \cdot N \qquad (4.6)$$

حيث:

H = الإرتفاع السائد بالمشجر (بالقدم)، N= عدد الأشجار (في الإيكر، الإيكر= 4000 متر).

هنالك نوع محدد من طرق تحديد الثوابت تعرف بطريقة إستخلاص الثوابت، وفيها إستخلاص الثوابت مباشرة من متوسطات قيم التوزيع. لهذا النوع من الإستخلاص استخدم هوي وقادو (1996) المعادلة:

$$F(x) = P(X \leq x) = \frac{1}{1 + e^{a - bx}} \qquad (5.6)$$

حيث:

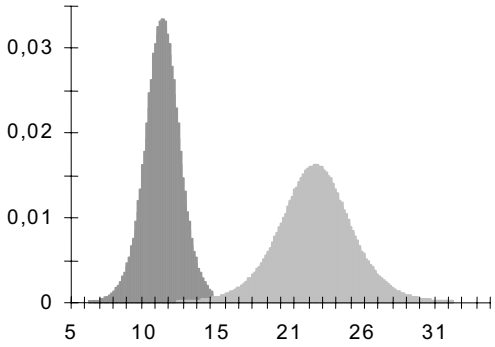
b = $(X_{F=0.9} - X_{F=0.5}) / 2.1972$

a = $-2.1972 + b(X_{F=0.9})$.

$$X_{F=0.5} = 0.4043 \cdot H_o^{0.2762} d_g^{1.504 \cdot H_o^{-0.1403}}$$

$$X_{F=0.9} = 1.2963 \cdot H_o^{0.1671} d_g^{0.7888 H_o^{-0.00668}}$$

وحيث: (H_0)= الإرتفاع السائد للمشجر (بالأمتار)، (dg)= القطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية يوضح الشكل (3.6) مثالين لتوزيعات قطرية تم حسابها عن طريق متوسطات قيم المشجر.



الشكل (3.6): توزيعات أقطار حسبا عن طريق إستخلاص الثوابت (إلى اليسار: متوسط القطر= 12سم، الإرتفاع السائد= 10متر. إلى اليمين: متوسط القطر= 25سم، من الإرتفاع السائد = 20متراً (خذت من هوي وقادو، 1996).

يتحدد شكل توزيع الأقطار ليس فقط عن طريق نمو الأشجار، وإنما ايضاً عن طريق عمليات التخفيف (الشلخ)، لذا فإنه من المهم حساب التغييرات التي تطرأ على الثوابت بعد أي عملية تخفيف. هنالك مثال قدمه إلفاريز (1997) لحساب التغييرات المستقبلية في ثوابت معادلة ويبل لتوزيع الأقطار بعد عملية تخفيف لمشاجر من النوع الشجري(*Pinus pinaster*) في أسبانيا وقد أستعمل لذلك المعادلة الآتية.

$$b_{nach} = -4.7067 + 1.0205 \cdot b_{vor} + 85.35 \frac{N_{aus}}{N_{ges}} - 73.617 \frac{G_{aus}}{G_{ges}} \qquad (6.6)$$

$$c_{nach} = -1.059 + 1.178 \cdot c_{vor} + 8.170 \frac{N_{aus}}{N_{ges}} - 5.255 \frac{G_{aus}}{G_{ges}} \qquad (7.6)$$

حيث:

$c_{nach}, c_{vor}, b_{nach}, b_{von}$ = قيم الثوابت (b) و(c) قبل وبد عملية التخفيف.
N_{ges}, N_{aus} = عدد الأشجار في الهكتار (التي قطعت عند التخفيف والعدد الكلي قبل التخفيف)
G_{ges}, G_{aus} = المساحة القاعدية في الهكتار (الناتجة من عملية التخفيف والكلية قبل الخفيف).

من محاسن التنبؤ بالتوزيعات القطرية ما يعرف بالتوافق، أي أن هنالك مستويان للنموذج الرياضي: مستوى المشجر في شكل متوسطات قيم ومستوى الشجرة المفردة في شكل توزيعات تكرارية، وكلاهما موجود في نفس النموذج الرياضي. يمكن الحصول على تفصيل عن الأشجار الممثلة من متوسطات قيم المشجر، والتي تعتبر مهمة جداً للتنبؤ بتصنيف الإنتاج.
من العناصر الأساسية للنماذج الرياضية الخاصة بالشجرة الممثلة إيضاح العلاقة بين الأقطار والإرتفاعات للأشجار المفردة. يتم هذا عن طريق ما يعرف بالمنحنيات الموحدة للإرتفاع.

2.1.6 الطريقة المبسطة لحساب تطور الأقطار

وهذه من الطرق المفضلة للتنبؤ بتطور أقطار الأشجار المفردة في أي مشجر، وتعتمد على الفروقات الجبرية لمعادلة النمو. تعرف المعادلة التي تستخدم لهذا الغرض بمعادلة متشرلش وقد قام بإستعمالها كل من سابورفسكي (1982) و ليم (1991).

$$d_{2i} = d_{1i}\frac{1-e^{-k(t_2-t_0)}}{1-e^{-k(t_1-t_0)}} \qquad (8.6)$$

حيث:

t_2, t_1 = عمر المشجر في بداية ونهاية فترة النمو على الترتيب.
d_{2i}, d_{1i} = القطر عند مستوى إرتفاع الصدر للشجرة (i) بالسنتمترات في العمر t_2, t_1 .
t_0 = العمر الذي يصل فيه إرتفاع الشجرة إلى مستوى الصدر.
k = ثابت، يتم الحصول على قيمته تجريبياً.

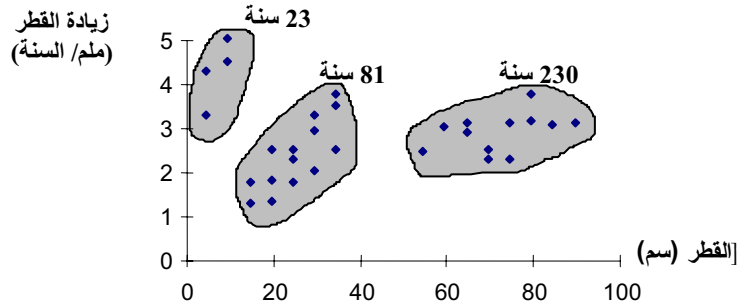
مثال: في إطار حصر غابي تم الحصول على توزيع أقطار مشجر يبلغ من العمر 50 عاماً، وقد كان الإرتفاع السائد يساوي 19 متراً. يتم حساب الثوابت (k) و(t_0) من الإرتفاعع السائد كالآتي:

$$k = 0.003257 + 0.000016\,(19) = 0.00356 \quad \text{und} \quad t_0 = 469\,e^{-0.35379(19)} = 0.56\,.$$

إذا أريد حساب القطر عند مستوى الصدر لشجرتين في هذا المشجر الذي تساوي كثافته الشجرية 1.0 (مكتمل الكثافة) حتى العمر 55 سنة الذي فيه قطر الشجرة الوسطية المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة 1 حالياً 13سم والحد الأدنى للقطر هو 9سم (الشجرة 2). بإستعمال المعادلة (8.6) نحصل على:

$$d_{21} = 13\frac{1-e^{-0.00356(55-0.56)}}{1-e^{-0.00356(50-0.56)}} = 14.2cm \quad \text{und} \quad d_{22} = 9\frac{1-e^{-0.00356(55-0.56)}}{1-e^{-0.00356(50-0.56)}} = 9.8cm$$

يوضح هذا المثال أحد عيوب الطريقة المبسطة لحساب تطور الأقطار،إلا وهو الحافظ على المدى المطلق، بمعنى أن النسبة بين قطري الشجريتن لم تتغير طيلة فترة النمو. لقد أثبت شفاباخ (1905) أن معدل زيادة القطر في الأعمار المتساوية يزيد كلما زاد القطر الإبتدائي، وقد أكدت عدة تجارب أخرى صحة ذلك.



الشكل (4.6): العلاقة بين القطر عند مستوى الصدر والزيادة في القطر في مشاجر (Quercus ptraea) مختلفة الأعمار (ز = زيادة القطر بالملمتر في السنة، س= سنة، ط= القطر بالسنتمترات)

3.1.6 التغيير في المساحة القاعدية النسبية

يمكن التخلص من العيب المذكور في الطريقة المبسطة لحساب تطور الأقطار (وهو على المدى المطلق) إذا تم إختيار طريقة يراعى فيها عدم ثبات نسب متغيرات الشجرة (مثل القطر، الإرتفاع،..) خلال فترة التنبؤ وذلك بإستخدام المساحة القاعدية النسبية (rg)، وهي نسبة المساحة القاعدية للشجرة (i) إلى المساحة القاعدية للشجرة الوسطية.

$$rg_2 = \frac{g_{2i}}{\overline{g}_2} \quad \text{und} \quad rg_1 = \frac{g_{1i}}{\overline{g}_1} \tag{9.6}$$

حيث:

g_{2i}, g_{1i} = المساحة القاعدية للشجرة (i) في العمر الإبتدائي والعمر النهائي (بالسنتمتر المربع)

$\overline{g}_2$ $\overline{g}_1$ = متوسط المساحة القاعدية للمشجر في العمر النهائي والإبتدائي (بالسنتمتر المربع).

تعتمد الفكرة من ان المساحة القاعدية النسبية للشجرة (i) تتغير مع تغير العمر وتستمر أبعاد الشجرة الضعيفة في التناقص، بينما تستمر أبعاد الشجرة القوية في التزايد مع مرور الزمن. يمكن التعرف على هذا التطور من خلال ما قدمه كلاتر وجونس (1980).

$$rg_2 = rg_1^{\left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{\beta}} \tag{10.6}$$

حيث: t_2, t_1 = عمر المشجر في بداية ونهاية فترة التطور.

يتم حساب المساحة القاعدية (g_{2i}) في العمر (t_2) للشجرة (i) عند معرفة المساحة القاعدية (g_{1i}) للشجرة (i) في العمر (t_1) ومتوسط المساحة القاعدية للشجرة الوسطية ($\overline{g_2}$) و ($\overline{g_1}$).

مثال:

المساحة القاعدية لشجرتين في مشجر إفتراضي عمره 50 سنة كانت كالآتي:

g11= 132.7 سم مربع، g12= 54.5سم مربع، المساحة القاعدية للشجرة الوسطية في عمر 50 سنة $\overline{g_1}$ = 201.1سم مربع.

بإستعمال نموذج رياضي للمشجر سيكون متوسط المساحة القاعدية للشجرة في عمر 55 سنة $\overline{g_2}$ = 283.5سم مربع. إذا كانت قيمة β = 0.3، ستكون المساحات القاعدية بعد 5 سنوات لكل من الشجرتين كالآتي

$$g_{21} = 283.5\left[\frac{132.7}{201.1}\right]^{(55/50)^{0.3}} = 184.8cm^2$$

$$g_{22} = 283.5\left[\frac{254.5}{201.1}\right]^{(55/50)^{0.3}} = 361.2cm^2$$

من الواضح أنه عبر هذه الطريقة قد تم تفادي الحفاظ على النسبة بين مساحتي القاعدة للشجرتين، وهو العيب الأساسي الموجود في الطريقة السابقة، لانه من المثال نجد أن $\left(\frac{361.2}{184.8} > \frac{254.5}{132.7}\right)$.

توصل بينار (1990) إلى أن النموذج الرياضي لتغير المساحة القاعدية النسبية يمكن تشكيله توافقياً، إذا كان مجموع المساحات القاعدية لكل الأشجار المفردة يساوي تماماً المساحة القاعدية للمشجر التي يتم حسابها عن طريق النموذج الرياضي للمشجر في العمر (t_2). يمكن الحصول على هذا التوافق من خلال المعادلة (11.6).

$$N_j g_{2j} = G_2 \frac{N_j (rg_{1j})^a}{\sum_{j=1}^{k} N_j (rg_{1j})^a} \qquad (11.6)$$

حيث: N_j =عدد الأشجار في الصف القطري التي تستطيع البقاء على قيد الحياة حتى العمر (t_2) و $a = \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^{\beta}$.

إن النموذج الرياضي لتغير المساحة القاعدية أكثر صحة وأفضل بيولوجيا من الطريقة المبسطة لحساب تطور الأقطار، وذلك نظراً لقدرته على تفادي العيب الذي سبق ذكره في الأخير (الحفاظ على النسبة بين مساحتي القاعدة) أما العيب الأساسي في الطريقتين معاً هو أنهما مرتبطان تماماً بمعرفة العمر، مما يجعل إستعمالها للتنبؤ في الغابات المختلطة غير متساوية الأعمار أمراً شديد الصعوبة، إن لم يكن مستحيلاً.

4.1.6النماذج الرياضية الإنتقالية

في الغابات الطبيعية (التي تخضع لإدارة) والغابات المدارية المختلطة، حيث توجد أشجار من مختلف الأعمار، يسهل الحصول على أقطار الأشجار من خلال القياسات ولكن لا يمكن (في كثير من الحالات) معرفة أعمارها. من المؤكد ان التكلفة ستكون عالية جداً إذا فكرنا في تحديد الإعمار لمثل هذه الغابات. في مثل هذه الحالات فإنه لا يمكن حساب النمو إلا بطرق لا تعتمد على العمر. من الطرق التي وجدت إستعمالاً وأسعاً في المشاجر متعددة الأعمار طريقة تعتمد على ما يعرف بالنماذج الرياضية الإنتقالية. من الممكن وصف تطور توزيع الأقطار خلال أي فترة زمنية محددة كالآتي:

$$\begin{bmatrix} f_1' \\ f_2' \\ f_3' \\ . \\ . \\ f_m' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & \dots & 0 \\ b_1 & a_2 & \dots & 0 \\ 0 & b_2 & \dots & 0 \\ . & & & \\ . & & & \\ 0 & & \dots & a_m \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} f_1 + C \\ f_2 \\ f_3 \\ . \\ . \\ f_m \end{bmatrix}$$

حيث:

c = النمو الداخلي (عدد الأشجار الصغيرة التي لم تقاس في المرة الأولى، وفي المرة التالية دخلت في أصغر صف قطر.

F = عدد الأشجار التي توجد عند نقطة زمنية محددة (t) في صف القطر (i)

a_i = إحتمال بقاء شجرة من صف القطر (i) في صف قطرها عند نهاية الفترة.
bi = إحتمال أن تخرج من الصف القطري (i) إلى الصف القطري الأعلى.
f = عدد الأشجار التي توجد عند النقطة الزمنية (t +1) في الصف القطري (i).
ينتج عن جمع محتويات الأعمدة أعلاه ما يأتي.

القيمة	المعنى
1	
أقل من 1	حالات موت أشجار
أكثر من1	نمو داخلي وإضافة لأقل صف قطر

يعتمد تحول (إنتقال) أشجار من صف قطر إلى صف قطر أعلى خلال أي فترة زمنية على معدل الحركة (Movement ratio) وتكتب إختصاراً (mr)، ويمكن تعريفه كالآتي:

$$mr_{ij} = \frac{\Delta d_i}{b}$$

حيث:
mr_{ij} = الجزء من الأشجار الذي ينتقل من الصف القطر (i) إلى الصف القطر (j) الأعلى
Δd_i = متوسط زيادة القطر في الصف القطري (i) بالسنتمتر.
b = عرض الصف القطري (= بين أعلى الصف القطري أدناه).

مثال: متوسط زيادة القطر في الصف (i) يساوي 1.5سم في سنتين، إذا إفترضنا أن صف القطر يساوي 4سم وأن توزيع الأقطار داخل الصف متساوي، فإن mr_{ij} = 1.5 /4 =0.375، أي أن 37.5% من كل الأشجار في الصف (i) ستنتقل في خلال سنتين إلى الصف القطري الأعلى (j).
مثال آخر: الجدول الآتي يوضح مشجراً إفتراضياً موزع على خمسة صفوف أقطار (n_1 = عدد الأشجار الإبتدائي، n_2 = عدد الأشجار بعد مرورفترة زمنية محددة).

d_i	mr_{ij}	n_1	n_2	d_i
14	0.25	4	3	0.5
16	0.50	8	5	1.0
18	0.40	5	7	0.8
20	0.25	4	5	0.5
22	0.20	0	1	0.4
		21	**21**	

من الأمثلة القديمة لطريقة الإنتقال ردودرا (1968) وسوزوكي (1971) وموسر (1974) وسلوبودا (1976) من الأمثلة الحديثة المنهج السهل الذي إستخدمه كولسروم (1992) لمشاجر النوع الشجري (*Picea abies*) في فلندا. المعادلة (12.6) تعمل على حساب الإحتمال (bi) الذي يفترض أن أي من الأشجار الموجودة في الصف القطري (i) (عرض الصف= 4سم) ستنتقل خلال 5 سنوات قادمة إلى الصف القطري الأعلى (عرضه 4 سنتمترات أيضاً)

$$b_i = e^{-2.1+0.86\ln(d_i)-0.55\ln(G)-0.0007G\cdot d_i} \qquad (12.6)$$

يتم حساب إحتمال إنتقال القطر (إلي صف أعلى) عبر القطر الإبتدائي (عند بداية الفترة) وكثافة المشجر: كلما زادت كثافة المشجر، كلما زاد القطر الإبتدائي، كلما زاد إحتمال الإنتقال.

مثال: في مشجر ما وجد أن المساحة القاعدية= 30 متراً مربعاً في الهكتار و100 شجرة في صف القطر الذي يساوي وسطه 20 سم (المدى= 18– 22). المطلوب حساب عدد الأشجار التي ستنمو خلال فترة الخمسة سنوات القادمة إلى الصف القطري الأعلى.

الحل: $bi = e^{-1.814} = 0.16$
أي أن 16% من الأشجار (16شجرة) ستنتقل إلى الصف القطري الأعلى (الذي يساوي وسطه 24 سم ومداه 22– 26 سم). أما بقية الأشجار (وعددها 84 تظل في الصف 18– 22سم).
البرنامج الحاسوبي التالي (9) يوضح إستعمال هذه الطريقة.

5.1.6 طريقة الحساب المباشر للزيادة

يمكن حساب الزيادة في القطر بإستعمال معادلة النمو أو معادلة الزيادة:

$$d_n = F(d_0, t) + e_1$$
$$\Delta d = f(d) + e_2$$

حيث: (e_1) و(e_2) يمثلان نسبة الخطأ. إن المعلومات عن الزيادة بشكل مباشر غير متاحة، لهذا السبب يعتمد الإنسان على حساب الزيادة عن طريق متوسط الزيادة لفترة زمنية محددة. يتم حساب زيادة القطر (Δd) تجريبياً عن طريق القطر (d)، على أن يراعى في ذلك الحصر على عدم ربط الزيادة بالعمر. كبديل لإستعمال الزيادات عن طريق تغيير المساحة القاعدية النسبية، عمل هيسنمولر (2002) على حساب الزيادة في القطر لعدة أنواع شجرية مستعيناً بمعادلة كورسن للنمو. تجدر الإشارة إلى أن المعادلة ثلاثية الأبعاد، التي وصفها عالم العلوم الطبيعية كورسن في العام (1935) مناسبة لعرض تطور النمو.

$$\Delta d = e^{\left[k_0 + k_1 \cdot \ln d + k_2 \cdot (\ln d)^2\right]}$$

$$\ln \Delta d = k_0 + k_1 \cdot \ln d + k_2 \cdot (\ln d)^2$$

حيث:

k_3, k_2, k	= ثوابت تحدد تجريبياً
d	= القطر عند مستوى الصدر (سم)
Δd	= الزيادة السنوية في القطر (سم)

يمكن حساب القيم عن طريق المعادلة الآتية:

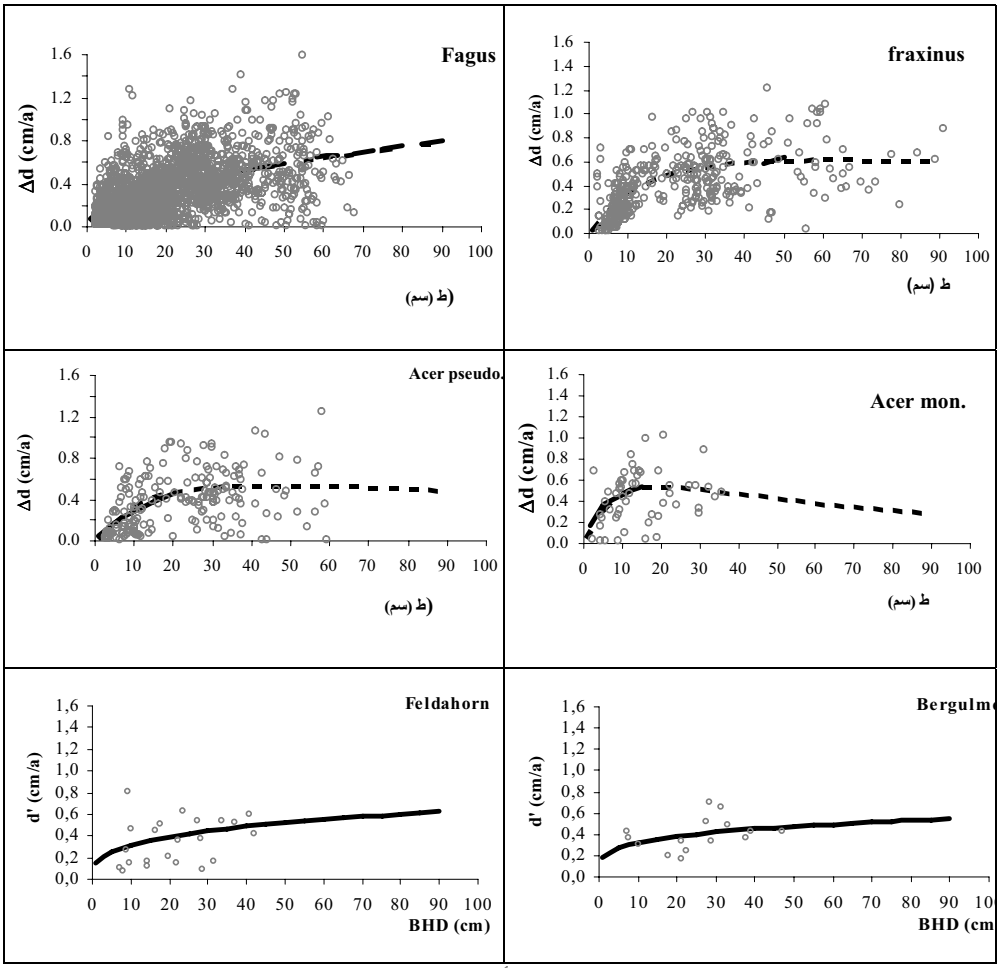
$$x = e^{-\frac{k_1}{2 \cdot C}}$$

عندما تكون (k_2) أكبر من صفر، فإننا نحصل على القيمة الدنيا وعندما تكون أصغر من صفر نحصل على القيمة القصوى. الجدول (1.6) يوضح قيم الثوابت لبعض الأنواع الشجرية الأوربية.

النوع الشجري	العدد	k_0	k_1	k_2	r^2	$rMSE$
Bergahorn	189	-3,8361	1,6707	-0,2187	0,23	0,252
Buche	2.271	-2,9752	0,7075	-0,0230	0,30	0,204
Elsbeere	29	-10,3508	7,1433	-1,2852	0,65	0,140
Esche	391	-3,6712	1,5263	-0,1839	0,38	0,191
Hainbuche	63	-1,2170	-0,0901	0,0105	0,00	0,171
Spitzahorn	53	-3,1971	1,7125	-0,2861	0,14	0,228

الجدول (1.6): قيم الثوابت للحسب المباشر بإستعمال معادلة كورسن (أخذ من هيسنمولر، 2002).

تثبت معادلة كورسن وصول زيادة القطر إلى قمتها مبكراً. من الواضح أن أكبر الفروقات توجد بين الأنواع الشجرية *Acer pseudoplatanus, Acer monspessulanum*. يتضح أيضاً أن مستوى مسار الزيادة في كل من- *Fogus sylvatica, Sorbus terminalis, Corpinus betulius*. متشابه إلى حد كبير. بالنسبة للنوع *Carpinus betulius* نجد أن العلاقة بين متوسط الزيادة السنوية والقطر ضعيفة جداً. من هنا يتضح أن المعادلتين يمكن تمثيلهما بخط مستقيم تقريباً.



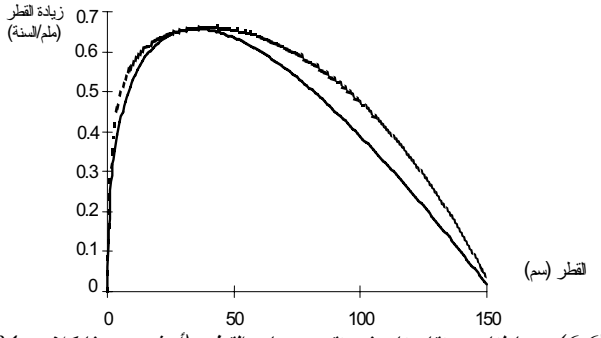
الشكل (2.6): العلاقة بين الزيادة السنوية والقطر لعدة أنواع شجرية (تم حسابها عن طريق معادلة كورسن) (ط= القطر البسنتمرات).

ذكر فانكلاي (1994) بعض الطرق التي تساعد على حساب الزيادة في أقطار الأشجار لبعض الأنواع الشجرية المدارية وقد كانت النتائج مشابهة للتي وردت أعلاه.

a) Beralanffy: $\Delta d = 0.245 \cdot d^{0.44} - 0.0147 \cdot d \quad \Delta d = 0.245 \cdot d^{0.44} - 0.0147 \cdot d$ (13.6)

b) Botkin: $$\Delta d = \frac{d - d^2 \cdot \frac{137 + 50.9 \cdot d - 0.167 \cdot d^2}{611677}}{2.74 + 1.527 \cdot d - 0.00668 \cdot d^2} \quad (14.6)$$

الشكل (6.6): نتائج إستعمال معادلتي بيرتلانفي (1948) وبوتكين (1993)، وهما يؤديان إلى نتائج متقاربة. من مشاكل هذه الطرق أن زيادة القطر تعتمد على القطر فقط، ويعتبر الهدف من ذلك تسهيل الطريقة، لان الزيادة تعتمد في واقع الأمر (أيضاً) عل كثافة المشجر وأشياء أخرى.



الشكل(6.6): معادلتا نم متقاربتان في تقدير زيادة القطر (أخذت من فانكلاي، 1994)

نظراً لوجود علاقة قوية بين الزيادة ومساحة التاج، فإنه يمكن، عبر هذه القيمة التي يمكن الحصول عليها من القطر، حساب نمو الشجرة الممثلة. يمكن إستعمال مؤشر التغطية التاجية (C66) كمقياس للتنافس التاجي الذي يعتمد على الأشجار المفردة. إستعمل ناقل (1994) هذه الطريقة لحساب النمو المستقبلي في شمال ألمانيا. لحساب مؤشر التنافس التاجي هنالك حاجة لمعلومات عن الشكل الخارجي للتاج (راجع الفصل الرابع في هذا الكتاب). من المؤكد أن الوصف الدقيق لشكل التاج في النماذج الرياضية للنمو غير المعتمدة على مواضع الأشجار داخل المشجر ليس مهماً جداً كما هو الحال في النماذج الرياضية المعتمدة على مواضع الأشجار. يقل معدل الزيادة في القطر وفي الإرتفاع كلما زادت التغطية التاجية (أي كلما قلت قيمة مؤشر C66).

6.1.6: حساب الزيادة عن طريق تحليل الإنحدار:

لحساب الزيادة السنوية في القطر (Δd_j) من المعلومات المتاحة إستعمل هيسنمولر (2002) ما يعرف بتحليل الإنحدار للشجرة الأقرب وتقرأ المعادلة كالآتي:

$$\Delta d_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} \Delta d_i \cdot G_i}{\sum_{i=1}^{N} G_i} \quad (15.6)$$

Δd_j = الزيادة السنوية للشجرة المجاورة.
N_i = عدد الأشجار المجاورة التي إخذت في الإعتبار.
G_i = وزن الشجرة الجارة الأقرب.

لحساب (G_i) يتم تحديد المسافة (W_i) بين الشجرة المرجعية (j) والشجرة المجاورة لها (i)، يمكن حساب المسافة (W_i) وبالتالي يمكن حساب المسافة (W_i) من المسافات (w) وأوزانها الجزئية (g) وذلك بإستعمال المعادلة.

$$W_i = g_1 \cdot w_1 + \ldots + g_n \cdot w_n \quad (16.6)$$

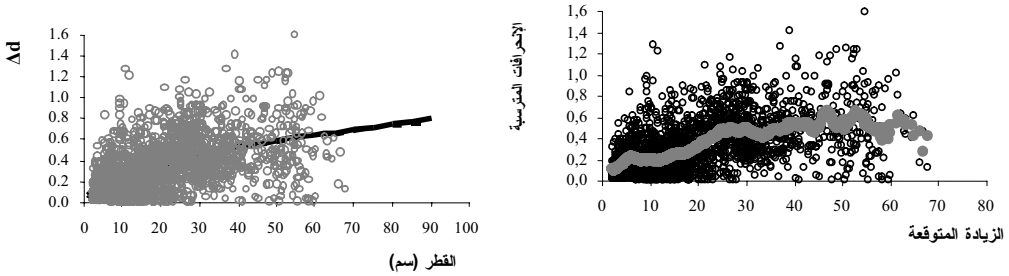
كمثال لذلك، فلنأخذ المميزات الآتية: القطر (D) والإرتفاع (H) لشجرة مجاورة (i) مقارنة بشجرة مرجعية (j).

$$W_i = g_D \cdot \left(D_i - D_j\right)^2 + g_H \cdot \left(H_i - H_j\right)^2 \qquad (17.6)$$

يمكن الحصول على وزن الشجرة المجاورة (i) من:

$$G_i = \frac{1}{1+W_i} \qquad (18.6)$$

الشكل (7.6) يوضح الزيادة الي تم حسابها (باللون الرمادي) مقارنة بالزيادة الحقيقية (التي تم الحصول عليها من خلال أعمال حصر) في مشاجر (*Fagus sylvatica*) عند إستعمال تحليل الإنحدار المعروف ب (knn) مع القطر عند مستوى الصدر (إلى يسار الشكل). إلى اليمين الإنحرافات المترسبة (Residuals) الي تم حسابها إعتماداً على قيم الزيادة المتوقعة. إذا توفر عدد كبير من الصفات (أقطار، إرتفاعات، إلخ) فإنه من المفيد عند إستعمال طريقة (knn) المقارنة بين هذه الصفات ومحاولة تقليص الفروقات. هنالك طريقة مناسبة لذلك وهي طريقة تحليل المكون الأساسي (Main component analysis). مقارنة بالنماذج الرياضية ذات الثوابت تمكن هاسنمولر (2002) من تلخيص نسبة الخطأ إلى النصف عن ريق إستخدام طريقة (knn).



الشكل (7.6): الزيادة التي تم حسابها (باللون الرمادي) مقارنة بالزيادة الحقيقية التي تمت في مشاجر (Fagus sylvatica).

7.1.6 المراجعة الدورية لمعلومات الحصر: مثال من أسبانيا

تعتبر المواكبة (المراجعة الدورية) لمعلومات الحصر من طبيقات نماذج النمو. لهذا الغرض قام شرودر (2001) بتطوير نموذج رياضي للزيادة في المساحة القاعدية (والنموذج لا يشترط معرفة العمر) للنوع الشجري (*Pinus pinaster*).

مثال: في مشجر بجنوب غرب أسبانيا تم قياس مربوع عينة مساحته 0.05 هكتار وقد كان عد الأشجار في هذا المربوع 77 شجرة. بلغ متوسط إرتفاع أكبر شجرات حجماً ومتوسط عمق التربة 40.83 سم. الجدول أدناه يوضح أقطار هذه الأشجار.

9.0	11.0	11.8	12.5	13.3	14.0	14.8	15.5
9.5	11.0	11.8	12.5	13.3	14.0	14.8	16.0
10.0	11.0	12.0	12.5	13.5	14.0	14.8	16.0
10.0	11.0	12.0	12.5	13.5	14.3	15.0	16.0
10.3	11.0	12.3	12.8	13.5	14.3	15.0	**16.5**
10.3	11.3	12.3	12.8	13.8	14.3	15.0	17.5
10.3	11.8	12.3	13.0	13.8	14.5	15.3	18.0
10.5	11.8	12.3	13.0	14.0	14.5	15.3	
10.5	11.8	12.3	13.0	14.0	14.5	15.3	
10.8	11.8	12.5	13.0	14.0	14.8	15.5	

الغرض من هذا المثال العددي هو حساب تطور قطر الشجرة (j) التي يساوي قطرها الآن 16.5 سم بعد مرور خمسة سنوات. لحساب حالة المنافسة التي تخضع لها الشجرة (j) حالياً، يجب حساب متغيرات المشجر أولاً، وهذه تساوي:

المساحة القاعدية (G) = 21.3 متراً مربعاً/ الهكتار.

عدد الأشجار (N) = 1540 شجرة/ الهكتار.

المتوسط النسبي للمسافات بين الأشجار (RS) = (10000/ 1540)$^{0.5}$ /8.8 = 0.29. في خطوة تالية يتم حساب مؤشر بال للشجرة (j). بالرجوع إلى مساحة مربوع العينة البالغة 0.05 هكتار يمكن الحصول على مؤشر بال:

$$BAL_{j\ \mathrm{PLOT}} = \frac{\pi}{4}\cdot\left(0{,}175^2 + 0{,}180^2\right) = 0{,}049\ \mathrm{m}^2$$

وعند تحويل المساحة الى الهكتار يتم الحصول على:

$$BAL_j = 0{,}049/0{,}05 = 0{,}98\ \mathrm{m}^2$$

بهذه النتيجة الوسيطة يمكن حساب ابنموذج BALMOD

$$BALMOD_j = \frac{\left(1-p_j\right)}{RS} = \frac{BAL_j/G}{RS} = \frac{0{,}98/21{,}3}{0{,}29} = 0{,}16$$

الضغط التنافسي الذي تخضع له الشجرة (j) يعتبر قليل نسبياً ولكن من المهم ليس فقط معرفة المنافسة الحالية. وإنما أيضاً تاريخ حياة الشجرة، وهذ الأخير يمكن حسابه بما يعرف بمعدل تمدد التاج (Crown spread ratio) وتكتب إختصاراً (csr)، وهو عبارة عن النسبة بين عرض التاج وإرتفاع الشجرة. يبلغ الإرتفاع في المثال أعلاه 8.3 متراً ومتوسط نصف قطر التاج (kr_j) يساوي 1.3 متراً وبهذا يمكن حساب معدل تمدد التاج (csr_j) للشجرة (j) كالآتي.

$$csr_j = \sqrt{cw_j \cdot h_j^{-0{,}5}} = \sqrt{2{,}6 \cdot 8{,}3^{-0.5}} = 0{,}95$$

يمكن تقييم تاريخ التنافس للشجرة (j) في المشجر بأنه وسط. بهذا تكون قد توفرت كل المعلومات التي تساعد على حساب تطور قطر الشجرة (j). من الممكن حساب الزيادة السنوية في المساحة القاعدية على طريقة شرودر (2001) كالآتي:

$\ln(\Delta g_j)$	=	+ 0,6266	نقطة التقاطع مع المحور الصادي
		+ 0,6088 ln(16,5)	القطر (d_j)
		- 0,00027 16,5^2	تربيع القطر (d_j^2)
		+ 0,8776 0,95	معدل تمدد التاج (csr_j)
		- 0,2041 0,16	المنافسة الحالية (بالمواد) ($BALMOD_j$)
		+ 0,0030 40,83	القدرة الإنتاجية للموقع (ESD)
	=	3,183 cm^2	

بعد الحصول على مقابل اللوغريثم الطبيعي ($In(\Delta g_j)$) نحصل على الزيادة في المساحة القاعدية لفترة الخمسة سنوات

$$\Delta g_{j\cdot 5} = 5 \cdot e^{3,183} = 120,595\ cm^2$$

بعد الخمسة سنوات تبلغ المساحة القاعدية للشجرة (j).

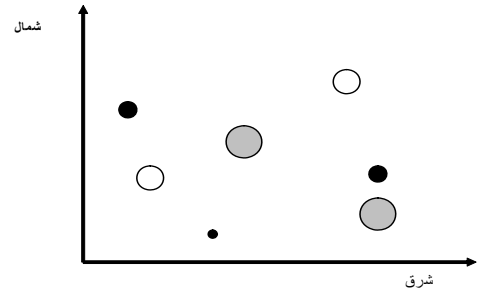
$$g_{j+5} = \frac{\pi}{4} \cdot 16,5^2 + 120,595 = 334,42\ cm^2$$

ويبلغ قطرها:

$$d_{j+5} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot 334,42} = 20,6\ \text{cm}$$

2.6 النماذج الرياضية التي تعتمد على مواضع الأشجار

من المميزات الإيجابية في النماذج الرياضية للشجرة الممثلة (غير المعتمدة على الموضع) هي أن قائمة القياسات التي يتم الحصول عليها من الحقل وحدها تكفي لإعطاء وصف لتطور الأشجار داخل المشجر، في حين يكمن عيب هذه الطريقة في المعلومات غير الكافية عن حالة المنافسة المباشرة للأشجار المفردة، تمتاز النماذج الرياضية للأشجار المفردة بأن موضع كل شجرة داخل المشجر يكون معروفاً (الشكل 8.6).



الشكل (8.6): مواضع الأشجار داخل مشجر. موضع كل شجرة محدد بالإتجاه والمسافة.

بتحديد موضع كل شجرة داخل المشجر يمكن إستخلاص علاقات التنافس في الجوار المباشر بالنسبة لأي شجر. من الممكن تحديد إحداثيات الأشجار تلقائياً من الصور الجوية أو بإستخدام إطار نظري لتحديد مواضع الأشجار.

1.2.6 إستخدام الإطار النظري لتحديد مواضع الأشجار

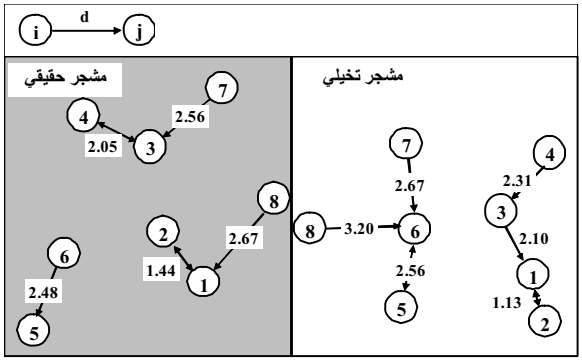
إن الهدف من إستخدام الإطار النظري لتحديد مواضع الأشجار هو التمكن من وصف أفضل للمعاملات الفلاحية (مثل القطع والتخفيف) وكذلك التمكن من إستخدام النماذج الرياضية التي تعتمد على مواضع معروفة للأشجار داخل المشجر. تعتمد الفكرة على درجة تطابق المواضع التخيلية للأشجار (الإطار النظري) في المشجر الحقيقي لوضع تصور مقارب لها، وبأي شكل؟ هنا يجب أن يتضح اللآتي: أي صفات المشجر الحقيقي يجب أ تبقى في الصورة (التخيلية) وأي الصفات يمكن أن تضيع أثناء عملية (خلق) الإطار النظر؟.
إن فكرة إعادة تصنيع (أو تكرار) الصورة فيما يتعلق بتوزيع أماكن الأشجار في الغابة التخيلية يمكن وصفه بأنه جيد (Perfect)، إذا كانت لكل شجرة في المشجر الحقيقي مناظرة لها في المشجر التخيلي، على أن تكون المسافة بين أي شجرة وجاراتها الثلاثة الأقرب في المشجر التخيلي مساوية للمسافة بين اي شجرة وجاراتها الثلاثة الأقرب في المشجر الحقيقي. بالإضافة إلى ذلك معرفة توزيع درجات التداخل بين تيجان الأشجار من الأنواع الشجرية المختلفة. يتم تحديد هذه الدرجة من التدخل عبر الأجزاء النسبية للشجرات الثلاثة المجاورة والتي تنتمي إلى نوع شجري مختلف. إذا حصل الإنسان على معلومة ان نسبة التدخل لشجرة متساوي 3:1 (مثلاً) فهذا يعني أن الأشجار الثلاثة المجاورة تنتمي إلى نوع شجري آخر والإثنتان الأخيرتان تنتميان إلى نفس النوع. يعتبر إنتاج مشجر تخيلي (فيما يتعلق بالإختلاط) مثالياً، إذا كانت المشاجر التي يتم إنتاجها تحمل نفس درجة إختلاط المشاجر الحقيقية وبنفس المستوى يتم التعمل مع متغيرات التمايز حسب الابعاد (الأقطار، الإرتفاعات، إلخ): فهى تأخذ القيمة القصوى للتمايز (وهى صفر) إذا كانت الشجرة المرجعية وجاراتها الثلاثة لها نفس القطر عند مستوى الصدر. فيما يتعلق بالتمايز حسب الأبعاد يعتبر المشجر التخيلي جيداً، عندما

تكون كل قيم المشجر الأصلي (الحقيقي) موجودة فيه. على الرغم من أن الهدف البعيد هو تحديد هذه التوزيعات بناءاً على المعلومات المتاحة ثم إستعمالها لحساب توزيعات المشجر التخيلي، فإن هذا العمل ينطلق من إفتراض أن كل الأزواج الخاصة بالمشجر الأصلي متاحة (متوفرة). في الختام يمكن تلخيص هذه الطريقة على النحو التالي:

يجب توزيع الأشجار المفردة في المشجر الحقيقي (التي تم وصفها عبر النوع الشجري والقطر) داخل مساحة المشجر بخطوط حدودية واضحة بشكل يجعل التوزيعات المحسوبة لتمايز الأبعاد ودرجات التدخل تتطابق مع التوزيعات في المشجر الحقيقي. إنطلاقاً من وضع الأشجار في الوضع الذي يراد داخل مساحة المشجر، يتم تحويل ونقل وإستبدال الأشجار حتى يتم الوصول إلى وضع يشابه حالة المشجر الأصلي. هنالك عدة مراحل تتم خلالها هذه العملية.

المرحلة صفر هي التحديد الأولي لأماكن الأشجار. يمكن تحديد أماكن الأشجار بتوزيع متوازن (مثلاً). يمكن التفكير أيضاً في أن توضع الأشجار في أماكن يتم تحديدها مسبقاً. يلعب التوزيع الأولي دوراً أكبر كلما كان المشجر مكتظاً بالأشجار. إذا كانت كثافة المشجر عالية جداً فإنه يكاد يستحيل تحديد إحداثيات الأشجار المفردة داخله.

تتكون المرحلة الأولى من ثلاث جزئيات مرتبطة. في الجزئية الأولى يتم شكيل المسافات لأقرب ثلاث شجرات، في الجزئية الثانية لأقرب شجرتين في الجزئية الثالثة المسافة لأقرب شجرة. يتم تكرار هذه الجزئيات الثلاث إلى حين الوصول إلى وضع تكون فيه كل المسافات مقنعة. الشكل (9.6) يوضح مثالاً لمشجر حقيقي (A) ومشجر تخيلي (B) مع بيان المسافات للجارات الأوائل. الأرقام داخل الدوائر توضح المرتبة التي أخذتها الشجرة المعينة في القائمة عند التصنيف على ضوء المسافات. لا توجد صعوبات تحول دون تقليل المسافات الكبيرة جداً. ولكن تكمن المشكلة في المساحات الصغيرة، لذلك قد يحتاج الإنسان لتحويل الشجرة وربما الشجرة المجاورة لها ايضاً (يعتمد رقم الشجرة التي يتم تحويلها على جزئية المرحلة).



الشكل (9.6): المسافات لأقرب أشجار في الجوار لمشجر حقيقي (إلى اليسار) وآخر (إلى اليمين) قبل كرار الحساب للمرة الثانية ((j) و(i) شجرتان متجاورتان، المسافة بينهما (d)).

إتضح من خلال العمليات الحاسوبية التحضيرية لإنتاج المشجر التخيلي أنه لابد من نقل شجرتين من جوار الشجرة المرجعية، حتى لو كانت تلك الشجرة تقع في منتصف المشجر. لتحديد إحداثيات شجرة (P) هنالك جاجة للمعلومات التالية:

- الإحداثيات الحالية ((P=(x,y)) للشجرة المعنية (المرجعية).
- الإحداثيات الحالية للشجرة المجاورة.
- البعد الحالي (A) للشجرة في المشجر الحقيقي التي إحداثياتها (P).
- البعد الحالي (B) بين الشجرة (P) والشجرة (Q).

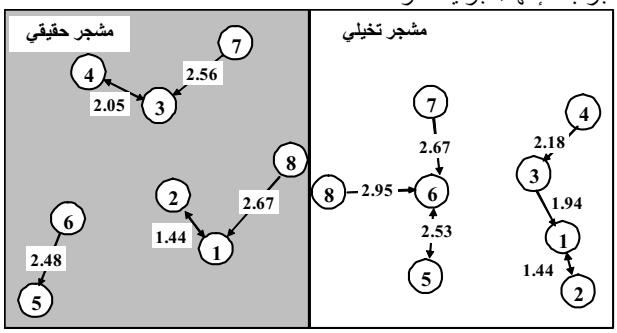
توجد الإحداثيات الجديدة (المؤقتة) للشجرتين (P) و(Q) دائماً على الخط من (P) إلى (Q). إذا كانت المسافة الحقيقية (B) تساوي المسافة المطلوبة (A)، فإنه لا يلزم تغيير، أما إذا كانت (B) أكبر من (A) مثلاً، فإن (Δ P) هي عبارة عن زيادة (أي حركة من P في إتجاه Q). تعتمد قوة (درجة) تغيير الموضع على الثابت والمسافات (A) و(B) وكثافة المشجر أو العلاقة بين (Q) و(P) (هل هما جارتان؟).

يتم حساب تغييرات الإحداثيات لكل شجرة في المشجر التخيلي وجاراتها ويتم تغيير الإحداثيات دائماً في بداية جزئية المرحلة. من الممكن أن تتعرض شجرة لعدة تغيرات (تنقل عدة مرات) إذا كانت هي ذاتها جارة

لأشجار مرجعية أخرى. بعد أخذ كل الأشجار في الإعتبار يتم جمع كل التغييرات التي أجريت لإحداثيات الشجرة. بعد إنتهاء جزئية المرحلة يمكن الحصول عل المكان الجديد للشجرة وذلك عن طريق جمع التغييرات بإستعمال المعادلة:

$$P_{new} = P + \Sigma \Delta P$$

هذا هوالوضع الجديد بعد نهاية جزئية المرحلة، حيث: (P_{new})= الموضع الجديد للشجرة، (P)= الموضع الإبتدائي للشجرة، ($\Sigma \Delta P$)= حاصل جمع التغييرات في موضع الشجرة. الشكل (10.6) يوضح مواضع الأشجار داخل مشجر بعد إنتهاء جزئية المرحلة.



الشكل (10.6): المسافات لأقرب الأشجار في مشجر حقيقي (إلى اليسار)، وآخر تخيلي صمم حسابياً (إلى اليمين).

يتضح من الشكل أن الشجرة 8 (مثلا) تبعد 2.95 متراً من اقرب جاراتها. كل المسافات الأخرى بين الأشجار أقرب مما يجب أن تكون، فيما عدا الشجرة 3. إذا خرجت إحد الأشجار خلال إحدى عمليات الإنتقال إلى خارج المشجر، لان مسافتها صغيرة جداً، وازيحت إلى حافة المشجر، يجب أن يتم إختيار إحداثيات لها، بحيث تظل الشجرة داخل المشجر. في المرحلة التي تتحسن فيها المسافة للشجرة الأقرب تسوء المسافة للجارتين الثانية والثالثة قليلاً، ولكن بإكمال الدورة (الجزئيات الثلاثة للمرحلة) تتحسن المسافات بين كل شجرة وجاراتها.

يمكن إستعمال هذه الطريقة (لوزن المسافات بين كل شجرة وجاراتها) في كل الأحوال. تؤثر الإحداثيات التي تبدأ بها العمل على التوزيع المكاني الذي يتم الحصول عليه بعد المرحلة الأولى. من الأفضل ألا يتم التحديد الأولي لمواقع الأشجار (في المشجر التخيلي) عشوائياً، بل يستحسن إتباع أسس معينة بناءاً على المعلومات الأولية المتوفرة عن المشجر الأصلي.

بعد المرحلة الأولى يتم تثبيت الإحداثيات. يتواصل العمل على وزن درجة الإختلاط في المشجر من التبادل المتتالي لكل شجرتين. هنا تراعى فقط الأشجار من أنواع شجرية مختلفة، لأن تبادل أشجار من نفس النوع لا يؤدي إلى تغيير درجة الإختلاط. يؤدي البحث عن كل بديل محتمل إلى درجة عالية من التعقيد، ويزيد تعقيداً كلما زاد عدد الأشجار بالمشجر. على سبيل المثال: إذا كانت لدينا في مشجر 47 شجرة مكونة من 3 أنواع شجرية (20 من النو الأول و15 من النوع الثاني و12 من النوع الثالث)، فإننا نحصل على عدد الإحتمالات عن طريق حساب التباديل، والنتيجة:

$$\binom{47}{20} \cdot \binom{27}{15} \cdot \binom{12}{12} = 1.697 \cdot 10^{20}$$

نظراً لهذا الكم الهائل من الإحتمالات التي تبعدنا عن الأمل في الحصول على التوزيع الأقرب للواقع يمكن إتباع طريقة أخرى.

في البداية يتم تعريف معيار لقياس درجة الإختلاط الحقيقية. مايمثله النوع الشجري في الحالة المذكورة أعلاه هو إما أن تكون الشجرة موجودة داخل رباعي الأشجار (الشجرة وجاراتها الثلاثة) أو غير موجودة أو توجد شجرتان من هذا النوع أو كل الشجرات الثلاثة (المجاورة) من نفس النوع. عليه فهناك واحد من هذه القيم الأربعة في كل حالة: (صفر)، (1)، (2)، (3). من الواضح أن هذه الطريقة أسهل من سابقتها التي تأخذ في الإعتبار العدد المطلق للأشجار. إذن يمكن تقديم المشجر الحقيقي كمؤشر لنسبة التمثيل لمطلق التكرارات

عندما يتعلق الأمر بتوزيع الإختلاط من الأشجار. يمكن حساب إنحراف المشجر التخيلي من المشجر الأصلي (فيما يتعلق بإختلاط أنواعه الشجرية) عبر مؤشر نسبة التمثيل (أي نسبة كل نوع). من الطرق المناسبة لقياس هذا الإنحراف يمكن قياس المسافة بين معدلات التوزيع، فإذا كان:

$m= (m_0, m_1, m_2, m_3)$

ومؤشر التمثيل في المشجر الأصلي

$n= (n_0, n_1, n_2, n_3)$

فإن

$$M_i = \sum_{k=0}^{i} m_k \text{ and } N_i = \sum_{k=0}^{i} n_k \ , \ i = 0,1,2,3$$

ومن هنال نجد أن

$$D = \sum_{i=0}^{2} |M_i - N_i|$$

ويتم تكرار العملية إلى حين الوصول إلى مسافة ثابتة.
كان ذلك فيما يتعلق بالمرحلة الأولى، أما حساب المرحلة الثانية فإنه يتم كاللآتي:
إنطلاقاً من توزيع الأنواع الشجرية في الوضع أعلاه (التوزيع الذي إنتهت عليه المرحلة الأولى) تجرى محاولة: هل يؤدي تبديل شجرتين إلى إنخفاض في مقياس الجودة؟ إذا كانت الإجابة بنعم، تجرى عملية التبديل، أما إذا كان التبديل لا يؤدي إلى نقصان في مقياس الجودة فيجري التبديل ترجعياً. إذا لم يحدث تبديل يؤدي إلى نقصان في مقياس الجودة، تكون المرحلة الثانية قد إنتهت.
من المثال أعلاه يجب أن يكون عدد المحاولات الممكنة:
$20\times15 + 20\times 12 + 15\times12 = 720$ محاولة.
يعني هذا أن هنالك 720 محاولة قبل الوصول إلى الوضع النهائي. يمكن إجراء العمليات الحسابية عن طريق حاسوب شخصي في زمن معقول. تؤدي مراعاة التبديل قبل الوضع النهائي (في العادة) إلى وضع (محلي) مناسب وبسرعة، وتعتبر هذه الطريقة صالحة لكل مكان. قد يحدث (أحياناً) ألا يكون التبديل الأفضل معروفاً بشكل جيد. إذا كانت هنالك عدة إحتمالات لإنفاذ التبديل فالأفضل دائماً الإبتداء بأول بديل.
تشبه مرحلة تناسب تمايز الأقطار المرحلة الثانية. هنا تتم المحاولة مرة أخرى عبر تبديلات زوجية للأشجار (هذه المرة من نفس النوع الشجري) بهدف الوصول إلى وضع تخيلي يشبه الوضع الحقيقي. تحسب جودة التناسب عن طريق متوسط الخطأ (الفروقات بين قيم المشجر الحقيقي والتخيلي). إذا كان: $(s_1,\ldots,s_n$ و$t_1,\ldots,t_n)$ هي قيم فروقات الأقطار في المشجر الحقيقي ولمشجر التخيلي، فإنه يمكن حساب متوسط الخطأ كالآتي:

$$E(s,t) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |s_i - t_i|$$

في مثال (المشجر الذي به 47 شجرة): إذا أريد إجراء التبادل لمختلف الأقطار عند مستوى الصدر، فإن عد الإحتمالات يساوي

$$20! \cdot 15! \cdot 12! = 1.524 \cdot 10^{39}$$

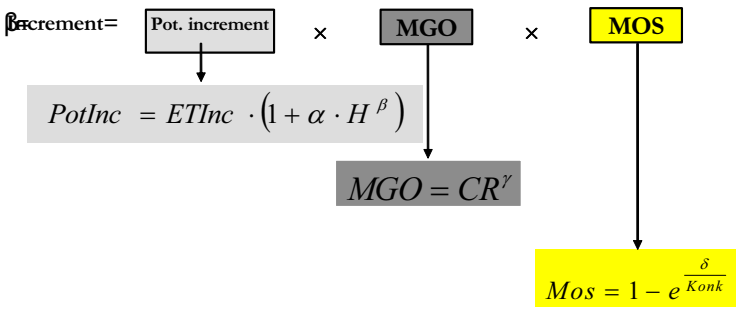
يمكن وصف المرحلة الثالثة في خطوة واحدة كالآتي: يتم تبديل الشجرتين من نفس النوع ويكرر ذلك إلى أن تقل درجة جودة القياس إلى حدها الأدنى. للمثال ألاه يكون عدد مرات التبديل:

$$\frac{20\cdot19}{2} + \frac{15\cdot14}{2} + \frac{12\cdot11}{2} = 375$$

إذا أحدث أفضل تبديل إنخفاضاً في جودة القياس. يتم تنفيذ التبديل وتنفذ خطوة اخرى بعد هذا التبديل. إذا لم يحدث من خلال كل التبديلات تحسناً في جودة القياس، تكون المرحلة الثالثة ومن ثم النموذج الرياضي كله قد وصلا إلى النهاية.
في حالة وجود عدد كبير من الأشجار يمكن إجراء التبديل الأول (الوارد في القائمة) الذي يؤدي إلى تقليل جودة القياس. إن إعادة تركيبات مشاجر (بناء مشاجر تخيلية) من قياسات مرابيع العينات المتاحة تعتبر شرطاً أولياً مهماً لاستخدام النماذج الرياضية للأشجار المفردة التي تعتمد على مواضع الأشجار.

2.2.6 النماذج الرياضية WASIM وMOSES

طور شتيربا (1983) نموذجاً رياضياً للشجرة المفردة في المشاجر المختلطة المكونة من *(Picea abies)* و*(Pinus sylvatris)* إعتماداً على معادلة إيك ومونسيرود (1974). الشكل (11.6) يوضح الصورة المبسطة للنموذج الرياضي.



الشكل (11.6): النوذج الرياضي للشجرة المفردة (WASIM) للمشاجر المختلطة من النوعين (Picea abies) (Pinus sylvatris) (أخذ من شتيربا، 1983، 1990).

الزيادة (Increment) في الإرتفاع أو في القطر لأي شجرة تساوي الزيادة الممكنة (Pot increment) مضروبة في معاملي تقليل MGOو MOS. أما ETInc فهي الزيادة في الإرتفاع السائد أو الزيادة في القطر (الناتجة من العلاقة بين الأقطار والإرتفاعات ويتم الحصول عليها من جداول الإنتاج). المتغير MGO وهو معيار لقياس التاريخ التنافس في المشجر ويتم تحديده عن طريق الدرجة التاجية (CR)، أما المتغير (MOS) فهو يصف التنافس الحالي على أساس مؤشر تنافس (Konk).

مثال: Picea abies، الإرتفاع= 20متراً، ETInc= 5ملم/ السنة، α= 1.16^{-12} ، β= 8.54، γ= 0.4001، δ= −4.81.

CR	Konk	Id
0.6	1.5	1.9
0.6	0.5	3.3
0.6	1.0	2.5
0.3	1.0	1.3

مع ثبات الدرجة التاجية (CR) ترتفع الزيادة في القطر بنقصان المنافسة. في الأشجار التي تخضع لنفس الدرجة من التنافس: تتناسب الزيادة في القطر طردياً مع حجم التاج (كلما كان التاج كبيراً كلما زاد معدل الزيادة في حجم الشجرة).

للنموذج الرياضي (MOSES) نفس تركيبية النموذج (WASIM) الذي ذكره، والفرق أنه تم حساب الثواب من جديد وأستعمل النموذج لأنواع أخرى من المشاجر. المعادلة (18.6) التي إستعملت لحساب الزيادة في الإرتفاع تشبه في تركيبتها الأساسية نموذج (MOSES).

$$\Delta h = \Delta h_{pot} \cdot CR^{\alpha} \cdot (1 - e^{\frac{-\beta}{CI}}) \qquad (18.6)$$

α= 0.0845، β= 6.158 (للنوع الشجري *Fagus sylvatica*). و α= 0.241، β= −3.953 (للنوع الشجري *Picea abies*).

يمكن إستعمال البرنامج الحاسوبي الآتي والمعروف (CR_CL) لحساب الدرجات التاجية ومؤشرات التنافس لكل الأشجار في مشجر (أماكن أشجاره معروفة).

```
Procedure CR_CI
const                    {globale Konstanten u. Variablen}
  maxN = 1000;
var
  Nr,BA                  : array [1..maxN] of byte;
  BHD,H,KAH,X,Y, ih_pot,id_pot,kd_pot,
  CR,CI,ih,id,delta_KAH  : array [1..maxN] of single;
  device1                : text;
  Flaeche,s, Zuwachsdat  : string;
  j,Stammzahl            : integer;
  Wuchsperiode, OH_Bon_Bu,OH_Bon_Fi : byte;
  Alter_Bu,Alter_Fi      : integer;

Procedure CR_CI;
{berechnet crown ratio (CR) und competition index (CI) fuer jeden Baum}
var
  ca,S_j,S_k,CI_sum,dist, overlap, help1,help2,help3,help4, help5,help6,help7,help8,
  winkel1,winkel2, CI_jk : real; k : byte;
begin
  for j:=1 to Stammzahl do   {aeussere Schleife}
  begin
    CR[j]:=(H[j]-KAH[j])/H[j];   {crown ratio}
  {für Berechnung des CI sind die Kronenfläche (CA), die Überlapp-}
  {ungsflaeche pot. Kronen (O) und Baumgroessenparameter (S) nötig}
    ca:=PI*sqr(kd_pot[j]/2);
    S_j:=h[j]*kd_pot[j];
    CI_sum:=0;        {Zurücksetzen der CI-Summe für nächsten Baum j}
    for k:=1 to Stammzahl do    {innere Schleife für overlap}
    begin
      if j<>k then
      begin  {Entfernung der Konkurrenten}
        dist:=sqrt(sqr(X[j]-X[k])+sqr(Y[j]-Y[k]));
       {Abfrage, ob Überlappung vorliegt}
        if dist<(kd_pot[j]/2+kd_pot[k]/2) then
        begin  {wenn eine Krone völlig überlappt wird}
          if dist<=abs(kd_pot[j]/2-kd_pot[k]/2) then
          begin
            if kd_pot[j]>=kd_pot[k] then
            overlap:=PI*sqr(kd_pot[k]/2)
            else overlap:=PI*sqr(kd_pot[j]/2);
          end
          else begin  {begin of else, d.h. dist>abs( )}
         {Formeln aus Mathebuch}
          help3:=(sqr(dist)+sqr(kd_pot[j]/2)-sqr(kd_pot[k]/2))
                 /(2*dist*(kd_pot[j]/2));
          help4:=(sqr(dist)+sqr(kd_pot[j]/2)-sqr(kd_pot[k]/2))
                 /(4*sqr(dist)*sqr(kd_pot[j]/2));
          help5:=sqrt((4*sqr(dist)*sqr(kd_pot[j]/2))
                 -sqr(sqr(dist)+sqr(kd_pot[j]/2)-sqr(kd_pot[k]/2)));
         {Umrechnung arccos in arctan, Bronstein, S.185}
          winkel1:=PI/2-arctan(help3/sqrt(1-sqr(help3)));
          help1:=winkel1-help4*help5;
          help6:=(sqr(dist)+sqr(kd_pot[k]/2)-sqr(kd_pot[j]/2))
                 /(2*dist*(kd_pot[k]/2));
          help7:=(sqr(dist)+sqr(kd_pot[k]/2)-sqr(kd_pot[j]/2))
                 /(4*sqr(dist)*sqr(kd_pot[k]/2));
          help8:=sqrt((4*sqr(dist)*sqr(kd_pot[k]/2))
                 -sqr(sqr(dist)+sqr(kd_pot[k]/2)-sqr(kd_pot[j]/2)));
          winkel2:=PI/2-arctan(help6/sqrt(1-sqr(help6)));
          help2:=winkel2-help7*help8;
          overlap:=sqr(kd_pot[j]/2)*help1+sqr(kd_pot[k]/2)*help2;
          end;  {end of else, d.h. dist>abs( )}
          S_k:=h[k]*kd_pot[k];
          CI_jk:=(overlap/ca)*(S_j/S_k);
          CI_sum:=CI_sum+CI_jk;
        end;
      end;
```

```
    end;    {Ende der inneren Schleife}
    CI[j]:=CI_sum;  {Konkurrenzindex für Baum j}
  end;   {Ende der äusseren Schleife}
end;
```

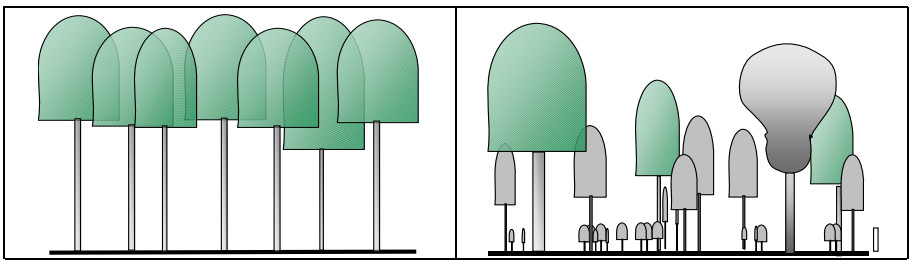
الجدول(6.6) يوضح نتائج حساب التطور بإستعمال النوذج الرياضي (MOSES)، ويحتوي المشجر على 15 شجرة.

المعلومات الأولية (المدخلية)							بعد مضي 5 سنوات		
NR	BA	BH	H	KAH	X	Y	BHD	H	KAH
1	2	12.1	14.2	4.7	12.50	2.10	16.83	17.81	5.70
2	2	12.8	14.2	6.5	9.40	3.10	15.61	17.34	7.19
3	2	5.7	9.2	4.6	5.20	3.30	8.43	12.59	4.82
4	2	9.8	14.2	7.6	6.20	3.70	10.58	16.10	8.17
5	2	12.4	14.2	8.2	2.90	4.20	13.51	16.40	8.65
6	5	12.8	12.5	8.4	12.40	4.30	13.93	14.25	8.99
7	2	6.3	10.0	3.5	5.90	4.70	7.50	12.47	4.02
8	2	8.8	12.7	6.5	5.40	4.80	9.37	14.39	6.99
9	2	5.5	9.9	6.2	5.10	5.00	6.51	12.14	6.36
10	2	4.4	8.2	5.9	14.00	5.50	10.63	12.18	5.94
11	2	6.2	11.1	8.3	4.90	5.60	6.82	12.85	8.41
12	5	19.7	15.6	9.2	8.30	5.80	19.97	16.48	9.88
13	5	19.4	14.7	7.3	10.60	5.80	20.49	16.33	8.18
14	2	9.3	16.1	8.0	13.10	5.80	11.04	18.65	8.89
15	2	9.7	14.0	5.4	6.00	6.10	10.01	15.27	6.45

الجدول (6.6): المعلومات الإبتدائية والنهائية لمشجر يحتوي على 15 شجرة (تم حساب التطور بإستعمال النموذج الرياضي (MOSES).

3.2.6 النموذج الرياضي (SILVA).

يتأثر نمو الشجرة بالضغط الجانبي لتيجان الأشجار المجاورة وبالتغطية التاجية والظل الواقع عليها من الأشجار المجاورة يمكن أخذ كل هذه العوامل من معادلة ثلاثية الأبعد (الشكل 12.6).



الشكل (12.6): رسم توضيحي يبين الضغط الجاني بين شجرتين متجاورتين (إلى اليسار) والتغطية (إلى اليمين) (أخذت من بريتش، 1992).

عند معرفة إحداثيات الأشجار وأنصاف أقطار التيجان وأشكالها، يمكن رسم الإحداثيات ووضع المعلومات في شكل جدول مكون من عدد من الخلايا. عند رؤية كل شجرة على الجدول يمكن التعرف على كل أنواع التأثيرات الواقعة عليها، وبهذا يشكل هذا الجدول تركيبة حقيقية للمشجر. ذكر برتش أن الزيادة في إرتفاع الأشجار من النوع *(Facus sylvatica)* يمكن حسابها عن طريق المعادلة (19.6).

$$\Delta h = \Delta h_{pot} \cdot CR^{0.088} \cdot Konk \qquad (19.6)$$

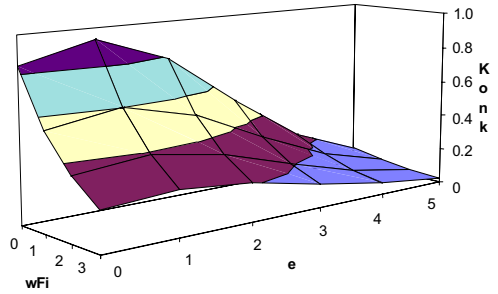
حيث:

Δh_{pot} = الزيادة الممكنة في الإرتفاع

CR = الدرجة التاجية.

Konk = مؤشر، يصف التنافس عبر التظليل والضغط التاجي الجانبي.

الشكل (13.6) يوضح تأثير الضغط التاجي الجانبي (e) والتظليل (wFi) على مؤشر التنافس (Konk) لشجرة من النوع *(Fagus sylvatica)* درجة تاجها= 0.5. يوضح الشكل أن هذه الشجرة متأثرة بالتظليل ولكنها متأثرة بشكل أكبر بالضغط التاجي الجانبي.



الشكل (13.6): مؤشر التنافس من النوع (Fagus sylvatica) درجة تاجها 0.5 عند قيم مختلفة لدرجة الظل والضغط التاجي الجانبي.

عمل بايير (1996) على تطوير وصف لحالة التنافس في الجوار المباشر لأي شجرة، عند معرفة مكان كل شجرة بالتحديد وطول تاجها وعرضه، فإنه يمكن رسم هذا المحيط كما يمكن حساب الضغط التنافسي الواقع على الشجرة المرجعية من الأجزاء المغطاة عن طريق صورة جانبية.

نظراً لقلة المعلومات المكانية المتاحة، فإن النماذج الرياضية للأشجار المفردة لا تستعمل للتنبؤ بتطور الغابة إلا في حالات قليلة. من المهم جداً تطور مثل هذه النماذج مستقبلاً وذلك لأن نمو الشجرة في ظروف معقدة، مثل المشاجر المختلفة غير متساوية الأعمار. لايمكن التنبؤ به إلا عن طريق النماذج الرياضية للأشجار المفردة.

7. النماذج الرياضية للعمليات الغابية

في الغابات الإقتصادية تتطور الغابة، ليس عن طريق نمو الأشجار، وإنما أيضاً (وقبل كل شيء) عن طريق العمليات الغابية (من تخفيف وخلافه). تؤثر عمليات التخفيف (الشلخ) على تغيير كثافة وتركيبة المشجر وكذلك على قيمة الأشجار الموجودة فيه. وبالتالي فإنها تحدد تطور الغابة في المدى المتوسط والطويل. في الوقت الذي يمثل فيه تصميم نماذج رياضية لنمو الأشجار الموضوع الأساسي في عدة بحوث، فإن التنبؤ بالتوقع المستقبلي للعمليات الفلاحية يلقي إهمالاً وآضحاً. مع زيادة الإهتمام بالغابات المختلطة غير متساوية الأعمار وإرتباط ذلك بالتوسع في أنواع المعاملات الفلاحية تصبح المصطلحات المتعارف عليها لوصف مختلف العمليات الفلاحية أقل دقة من ذي قبل.

يمكن تقدير التغيرات التي تطرأ على تركيبة المشاجر الغابية النقية ذات العمر المتساوي، عقب تنفيذ عمليات تخفيف مبرمجة، بشكل سليم نسبياً، أما في الغابات غير متساوية الأعمار ومتعددة الأنواع الشجرية، فإن تقديرات من هذا النوع تعتبر أكثر صعوبة.

1.7 الوصف الكلاسيكي لعمليت التخفيف

في الممارسة العملية للغابات يتم وصف العمليات الفلاحية بمراعاة قوة (درجة) ونوع التخفيف (Grade and type of thinning). ففي التخفيف المعتدل من أسفل يتم قطع الأشجار المحتضرة والميتة والضعيفة والمظللة بأشجار من حولها والأشجار المشوهة (Wolf trees) التي تشكل خطراً على ما حولها من اشجار، شريطة أن لا يؤدي قطع هذه الأخيرة إلى زيادة تفريع الأشجار المجاورة. تشير صفة (معتدل) إلى قوة عملية التخفيف ويمكن الا يكون هذا التعريف فعالاً، إذا كان بالإمكان وصف الأشجار المتبقية والأشجار التي تقطع بدقة وفي الواقع العملي يمكن ذلك عن طريق صفوف الأشجار (Tree classes). الجدول (1.7) يوضح نظامين مختلفين لفكرة تحديد صفوف الأشجار: نظام كرافت (1884) ونظام ويمناور (1902) الذي تبناه إتحاد المؤسسات الألمانية للبحوث، أما النظام الذي طوره الإتحاد العالمي لأبحاث الغابات (IUFRO) في العام (1956) فيتكون من تصنيف رقمي يحتوي على 6 أرقام ويقوم بالوصف الإجتماعي والفني والفلاحي لتصنيف الأشجار المفردة.

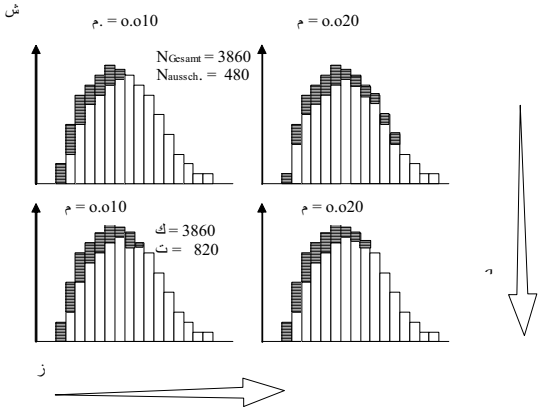
إتحاد المؤسسات الألمانية للبحوث (1902)	كرافت (1884)
1. الأشجار السائدة: وهي الاشجار التي تساهم في التغطية التاجية العليا.	1. الأشجار فوق السائدة: ذات تيجان ضخمة وممتدة بقوة.
1. أشجار تيجانها ذات تطور طبيعي وشكل الساق جيد.	2. الأشجار السائدة: وهذه تشكل بيئة المشجر الأساسية وتيجانها متطورة بشكل جيد.
2. أشجار تطور تيجانها غير طبيعي أو اشكال السيقان سيئة: الأشجار المشوهة، أشجار مريضة.	3. أشجار تساهم في السيادة بشكل محددز شكل التيجان شبه طبيعي وتشبه أشجار الصف الثاني (أعلاه) ولكن تطورها أضعف نسبياً ومعرضة للضغط من جاراتها الى حدٍ ما.
11. الأشجار المسودة (المضطهدة)، وهى التي لا تسهم في التغطية التاجية العليا. 3. أشجار متأخرة النمو، لكنها غير مغطاة. 4. أشجار مضغوطة توجد أسفل الأشجار السائدة (مغطاة)، ولكنها لا تزال قادرة على الحياة.	4. الأشجار المسودة (المضطهدة): تيجانها ضعيفة ومضغوطة، أما من كل الجوانب أو من بعضها. أ. اما أن تكون غير مغطاة من الأشجار المجاورة. ب. وتكون التغطية من جاراتها قد بدأت بالفعل.
5. أشجار تحتضر أو ماتت.	5. أ. أشجار مسيطرة عليها تماماً، ولكن تيجانها لاتزال حية. ب. أشجار تحتضر تيجانها أو ماتت.

الجدول(1.7): نظم تصنيف الأشجار: إلى اليسار: طريقة كرافت (1884) وإلى اليمين: طريقة إتحاد المؤسسات الألمانية للبحوث.

الهدف من التخفيف من اعلى في الاعمار المتأخرة للمشاجر هو إفساح المجال لعدد ونوع محدد من الأشجار لمواصلة النمو بعد قطع معظم الأشجار التي تعوق سرعة نموها. لتحقيق هذا الهدف يتم قطع الأشجار المريضة والأشجار غير القادرة عل الحياة وتلك التي تعوق تطور تيجان الأشجار المرشحة لتنمو. أطلق على هذا النوع مصطلح التخفيف الإنتقائي، حيث كان في القرن الماضي يتم ترشيح أشجار محددة لتواصل النمو حتى نهاية الدورة الغابية، وفي كل عملية تخفيف يتم في القرن الماضي يتم ترشيح اشجار من جديد. منذ حوالي 20 سنة صار تحديد الاشجار المستقبلية يتم مرة واحدة، ثم في كل عملية تخفيف تقطع الأشجار التي تحول دون نمو الأشجار المرشحة بشكل جيد.

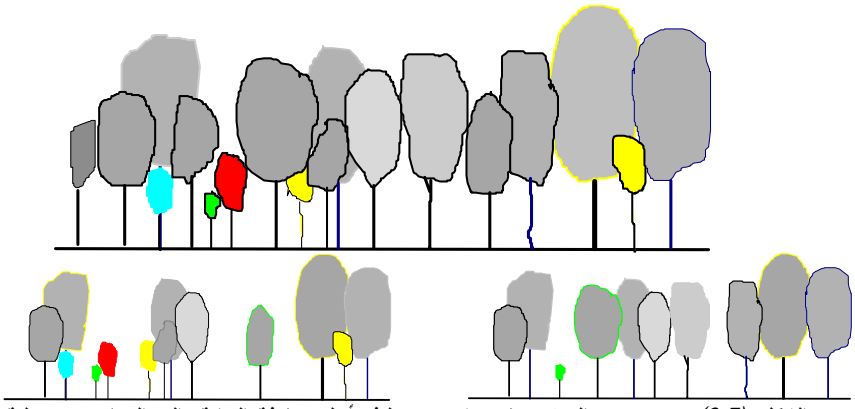
هنالك أكثر من تعريف واحد لمصطلح تخفيف الغابات الطبيعية المقفولة. لقد فهم بعض العاملين في مجال الغابات من هذا المصطلح: فكرة رعاية مشاجر لم تحظ بأي إهتمام ولم تمارس فيها أي عمليات فلاحية من قبل. في هذا النواع يتم قطع الأشجار الضخمة إذا كانت من نوعية غير جيدة (مشوهة السيقان أو خلافه)، وبهذا يفسح المجال للاشجار التي كانت مضغوطة (مسيطر عليها) بواسطة هذه الأشجار الضخمة، بشرط أن تكون الأشجار التي يتم تحريرها قادرة على النمو بشكل جيد، هو توجيه الزيادة للأشجار التي تم تحريرها بعد عملية التخفيف.

على الرغم من المحاولات المختلفة للتحديد الدقيق لصفوف الاشجار وعمليات التخفيف إلا أنه (حتى الآن) لا يمكن الوصف الدقيق للتخفيف الذي يحدث في الوقت الحاضر، ناهيك عن التنبؤ بالتخفيف الذي سيحدث في المستقبل. لقد تعرف فرانس (1972) إلى هذا العيب وحاول أن يعمل بمساعدة معامل تخفيف للمشاجر النقية متساوية العمر (الشكل (1.7). إذا أخذنا المشاجر المختلطة مختلفة الأعمار فإنه لا يمكن وصف كل إحتمالات التخفيف بمتغير واحد. هنالك مثالان لاستعمال المصطلحت البسيطة لوصف المحتويات المعقدة جداً، وهما التخفيف النوعي للمجموعات والتخفيف المرتبط بتركيبة المشاجر.



الشكل (1.7): تأثيرات التخفيف على التوزيع القطري لمشجر نقي متساوي العمر (أخذ من فرانس، 1972)
(م= معامل التخفيف، ش= عدد الأشجار، ت= أشجار تقطع في التخفيف، د= تزايد درجة التخفيف، ز= الزيادة نتيجة للتخفيف).

نظراً لصعوبة وصف العمليات الفلاحية داخل الغابة (بالتخفيف أو القطع)، تستعمل الأشكال التوضيحية لعرض تأثيرات مختلف درجات التخفيف. الشكل (2.7) يوضح الفروقات بين نوعين من أنواع التخفيف: التخفيف المعتدل والتخفيف من أعلى.



الشكل (2.7): نوعين من التخفيف في مشجر مختلط، أعلى: نقطة البداية. إلى اليسار بعد عملية تخفيف من أعلى، إلى اليمين: بعد عملية تخفيف معتدل.

من المؤسف أن الرسومات البيانية لا تساعد على عرض كل الإحتمالات للتغيرات التي تطرأ على المشجر نتيجة للتخفيف. هنالك عبء ثقيل على بحوث الغابات وهو محاولة الوصف الدقيق لعمليات التخفيف، وتعتبر هذه خطوة أولى تليها الخطوة الثانية وهي محاولة التنبؤ بعمليات التخفيف التي يجب أن تتم في المستقبل. من الواضح أن مثل هذه المهمة سهلة نسبياً في المشاجر النقية متساوية الأعمار، ولكنها أصعب بكثير عندما يتعلق الأمر بمشاجر مختلفة الأعمار ومختلفة الأنواع الشجرية.

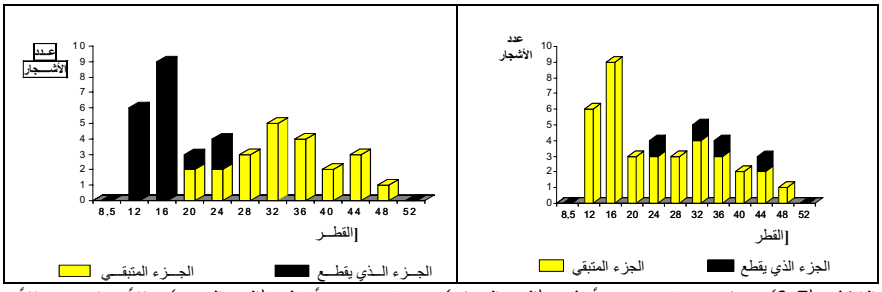
2.7 عمليات التخفيف في المشاجر النقية متساوية الأعمار

لوصف التغيير الذي يطرأ على توزيع الأقطار نتيجة لعمليات التخفيف وتوجد عدة طرق تم وصفها في موضع آخر يحتاج الوصف العملي لعمليات التخفيف لأستعمال متغيرات تعطي أدق تعابير ممكنة وتكون في نفس الوقت صالحة للتطبيق العملي. للتطبيق في مشاجر نقية متساوية الأعمار يمكن، على سبيل المثال، إستعمال النسبة بين عدد الأشجار والمساحة القاعدية وثابت التمايز أو الفصل (Separation parameter)، وبمعرفة مواضع الأشجار دآخل المشجر يمكن أيضاً إستعمال المسافات البينية وثوابت تركيبة المشجر.

العلاقة بين عدد الأشجار والمساحة القاعدية

من المقاييس المستخدمة كثيراً لتحديد العلاقة بين المساحة القاعدية الناتجة من عملية التخفيف والمساحة القاعدية الكلية للمشجر (اي مساحته القاعدية قبل التخفيف) وأيضاً تغير درجة كثافة المشجر. إلى جانب المساحة القاعدية يمكن أيضاً يمكن إستعمال مقاييس أخرى للكثافة. ففي المشاجر النقية ومتساوية العمر، مثلاً يمكن إستخدام المسافة النسبية للشجر، والتي يتم حسابها كنسبة بقسمة المسافة بين شجرتين على الإرتفاع السائد. تعتمد درجة التخفيف على عدة عوامل، أولها كثافة المشجر قبل التخفيف والأنواع الشجرية الموجودة والهدف الفلاحي من التخفيف وعمر المشجر.

إلى جانب درجة التخفيف هنالك أيضاً نوع التخفيف يؤثر بشكل فعال على تطور المشجر. يتحدد نوع التخفيف عن طريق قطع إنتقائي لأجزء مختارة من المجموعة الشجرية الموجودة. في الشكل (3.7) نتائج لعملية تخفيف من أسفل واخرى الخفيف من اعلى في مربوع عينة مساحته 0.1 هكتار.



الشكل (3.7): نتايج تخفيف من أعلى (إلى اليسار) وتخفيف من أسفل (إلى اليمين). الأجزاء من الأعمدة المظللة بالأسود تمثل الجزء الذي قطع والأجزاء الأخرى تمثل الجزء المتبقي بعد التخفيف.

في التخفيف من أعلى أزيلت 15% من المساحة القاعدية للمشجر، في حين أزيلت 16% من المساحة القاعدية في التخفيف من اسفل. في التخفيف من أعلى قطعت 45% من العدد الكلي للاشجار، اما التخفيف من اسفل فقد قطعت 10% فقط من عدد أشجار المشجر. لقد كانت درجتهما (قوتهما) واحدة تقريباً فيما يتعلق بالمساحة القاعدية التي إزيلت، في حين أنهما مختلفان من حيث النوع (فيما يتعلق بعدد الأشجار التي قطعت).
ينعكس نوع التخفيف عادة في التغيير الذي يطرأ على توزيع الأقطار. من الممكن وصف هذا التغيير بأشكال عديدة مثلاً عن طريق معامل التناسب بين عدد الأشجار والمساحة القاعدية.

$$NG = \frac{\left(N_{aus} / N_{ges}\right)}{\left(G_{aus} / G_{ges}\right)} = \frac{rN}{rG} \qquad (1.7)$$

حيث:

NG = النسبة بين عدد الاشجار والمساحة القاعدية.

N_{ges}, N_{aus} = عدد الأشجار الناتجة من التخفيف وعدد الأشجار الكلي (على الترتيب).

G_{ges}, G_{aus} = المساحة القاعدية للأشجار الناتجة من التخفيف والمساحة القاعدية الكلية للمشجر (على الترتيب).

من المعادلة (1.7) يمكن إستنباط العلاقة الآتية.

$$Dg_{aus} = NG^{-0,5} \cdot Dg_{ges} \qquad (2.7)$$

حيث:

Dg_{aus} =قطر الشجرة المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية من الاشجار التي قطعت في التخفيف

Dg_{ges} =قطر الشجرة المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية للاشجار الموجودة في المشجر قبل التخفيف.

للتخفيف من اعلى نحصل من المثال السابق (في الشكل 3.7) على: (NG)= 45/15= 3.0، أما للتخفيف من أسفل فنحصل على: (NG)= 10/16= 0.625.
عند (NG)= 1، يكون التخفيف في أشجار تقع أحجامها حول الشجرة الوسطية بالمشجر، وعند (NG) أقل من 1، يكون عدد الأشجار المقطوعة أقل من جزئية المساحة المقطوعة، بمعنى أن القطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية للجزء المقطوع من المشجر اكبر من نظيره في المشجر قبل عملية القطع. أما إذا كات العلاقة قيمة المؤشر (NG) أكبر من 1 فهذا يعني (نظرياً) تخفيف من أعلى. بناءاً على ذلك فإن نوع التخفيف يعتمد على العلاقة بين المؤشر (NG) والعدد1.
أسفر تحليل كمية كبيرة من المعلومات التي جمعت بواسطة مؤسسة بحوث الغابات في سكسونيا السفلى بألمانيا عن علاقة قوية تربط بين نوع التخفيف والمؤشر (NG). طور شتاوبندا (1999) نموذجاً رياضياً للتخفيف يعمل على حساب توزيع أقطار الأشجار التي يتم قطعها في عملية التخفيف بمساعدة معادلة ويبل التوزيعية. اسفر تحليل الإنحدار للثوابت (b) و(c) في معادلة ويبل عن الآتي:

$a_{aus} = a_{ges}$

$b_{aus} = 0{,}1230 + 1{,}0670 \cdot (Dgaus - a_{aus})$ $R = 0{,}99$

$c_{aus} = 8{,}0665 + 0{,}0554 \cdot Dg_{aus} - 2{,}2392 \cdot \ln(a_{aus}) - 0{,}0013 \cdot n_{ges}$ $R = 0{,}39$

حيث:

a_{ges} = ثابت ويبل (a) للمشجر قبل عملية التخفيف.

Dg_{aus} = القطر المحسوب من المساحة القاعدية للشجرة الوسطية (للجزء الذي يقطع في عملية التخفيف).

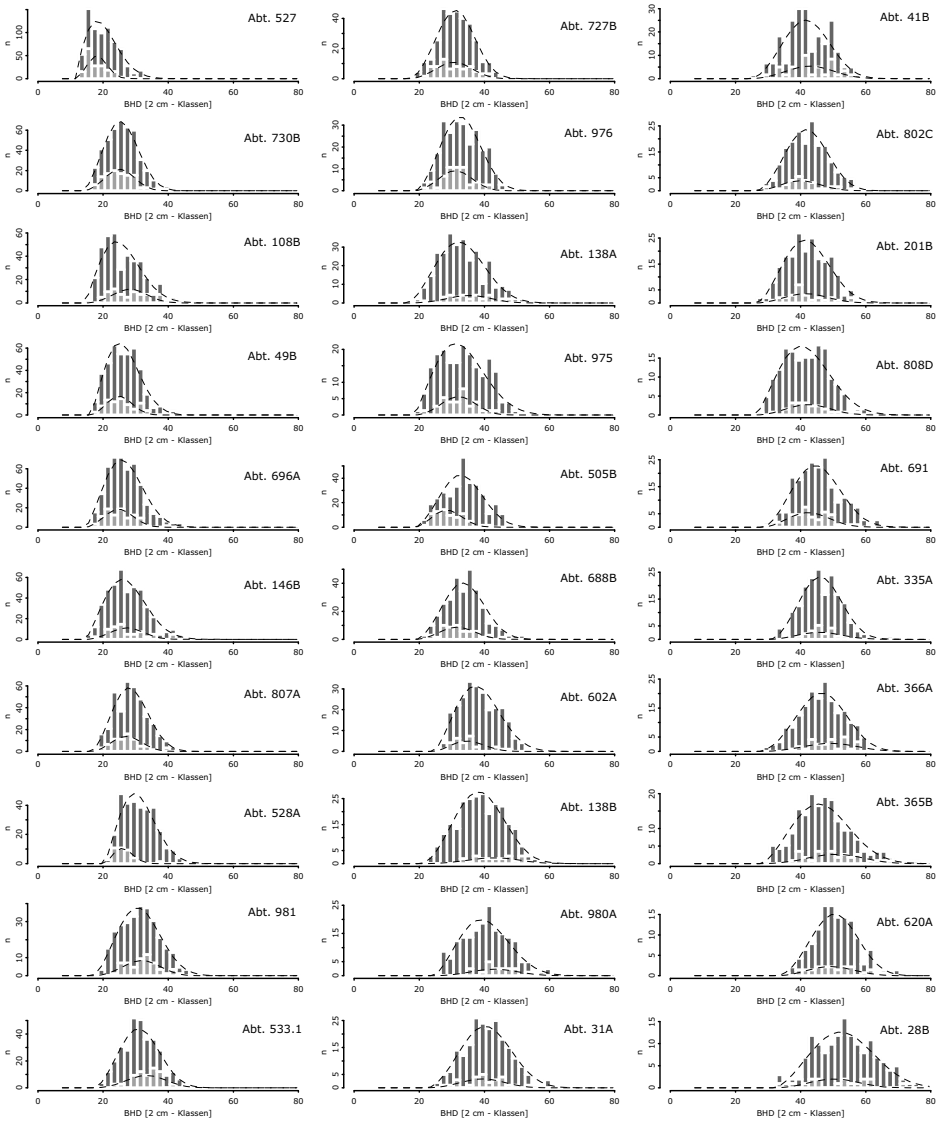
N_{ges} = العدد الكلي للأشجار (قبل التخفيف).

يمكن حساب Dgبالنسبة من المشجر الذي يقطع في عملية التخفيف بإستعمال المعادلة (2.7)، ومن ثم يمكن تحديد نوع التخفيف، إذن القيم التي تدخل في النموذج الرياضي لعملية التخفيف هي:

1). Dg، الثابت (a) والعدد الكلي للأشجار قبل عملية التخفيف.

2). أي أثنين من المتغيرات الآتية: (rN)، (rG)، (NG). يمكن أن تعطي قوة التخفيف (rN) مباشرة أو يتم حسابها من المساحة القاعدية النسبية للأشجار التي يتم قطها (rG) وقيمة (NG) (المعادلة 1.7).

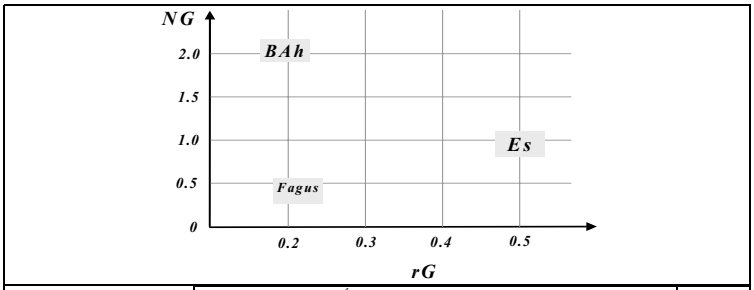
بعد حساب توزيع أقطار الأشجار التي ستقطع في عملية التخفيف يمكن تحديد توزيع الأشجار المتبقية بعد التخفيف، وذلك عن طريق طرح تكرارات صفوف أقطار الأشجار الناتجة من التخفيف من صفوف تكرارا المشجر الكلي (أي قبل التخفيف). بإعطاء النموذج الرياضي للتخفيف القيم للمؤشر (NG)، ففيه يمكن الحصول على توزيعات اقطار الأشجار التي تقطع في عملية التخفيف والأشجار المتبقية بعد ذلك (الشكل 4.7، أخذ من شتاوبندال، 1999).



الشكل(4.7): التوزيعات القطرية لثلاثين شجرة من النوع (Fagus sylvatica) (ط= القطر)

توضح الأعمدة في هذه الأشكال التكرارات المطلقة (اللون الداكن= المشجر بعد التخفيف، اللون الفاتح= ناتج التخفيف، الخط المتقطع الأسفل يوضح التوزيع القطري للجزء الذي قطع حسب النموذج الرياضي والخط المتقطع الأعلى يوضح التوزيع الذي تم حسابه للمشجر (ككل) عن طريق معادلة ويبل التوزيعية).

يمكن حساب توزيعات اقطار الاشجار من عملية التخفيف والمتبقية بعده برمجة معقولة من الدقة بواسطة النموذج الرياضي للتخفيف، إذا عرفت القيم الحقيقية للمؤشر (NG)، اما إذا لزم حساب قيم المؤشران فمن الممكن ظهور إنحرافات كبيرة، خصوصاً إذا كان نوع التخفيف المطبق في الواقع يختلف عن المنهج الذي حدده برنامج التخفيف المعمول به. لإن المعلومات المتعلقة بدرجة (قوة) الخفيف (rG) ونوع التخفيف (NG) لأي نوع شجري في الغابات المختلطة ذات أهمية خاصة، عندما يتعلق الأمر بتصميم نماذج رياضية. الشكل (5.7) يوضح معلومات عن غابة مختلطة قام بتحليلها قادو وهيدكة (2001).



النوع الشجري	عدد الأشجار/الهكتار			المساحة القاعدية م م/الهكتار			NG
	كل المشجر	التخفيف	rN	كل المشجر	التخفيف ف	rG	
Fagus sylvatica	485.1	41.7	0.09	14.1	2.9	0.21	0.43
Acer pseudoplatanus	36.7	15.0	0.41	3.1	0.6	0.19	2.15
Fraxinus excelsior	38.3	18.3	0.48	1.9	1.0	0.52	0.92
أنواع أخرى	106.6	0	0	9.3	0	0	0
المجموع	666.7	75.0	0.11	28.4	4.5	0.16	0.69

الشكل (5.7): أنواع ودرجات التخفيف المعتمدة على النوع الشجري في مشجر (Fagus sylvatica) مختلط.

الجزء من المساحة القاعدية الذي يقطع (rG) يساوي 16% من المشجر ككل، من كل نوع في الجدول أعلاه (على ترتيب الأنواع الشجرية) 21%، و19% و52%. وتبلغ قيم (NG) لنفس الأنواع 0.43 و2.15 و0.9 على الترتيب ايضاً.

ثابت التمايز (ثابت الفصل): Separation parameter

يعتبرثابت التمايز (SI) واحد من المتغيرات لتقييم نوع التخفيف، وهو عبارة عن الفرق بين قيم الأقطار عند مستوى الصدر للأشجار المتبقية بعد التخفيف وتلك التي قطعت في عملية التخفيف ثم قسمة هذا الفرق على الإنحراف المعياري لأقطار أشجار المشجر قبل عملية التخفيف.

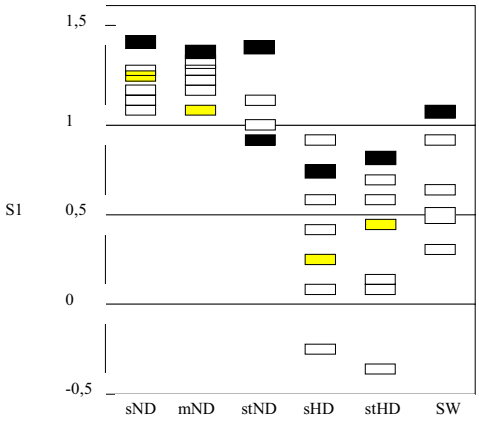
$$S_1 = \frac{d_{ver} - d_{aus}}{\sigma^2_{ges}} \qquad (3.7)$$

حيث:

d_{aus}, d_{ver} = متوسط قطر الأشجار المتبقية بعد التخفيف والأشجار الناتجة من التخفيف على الترتيب.

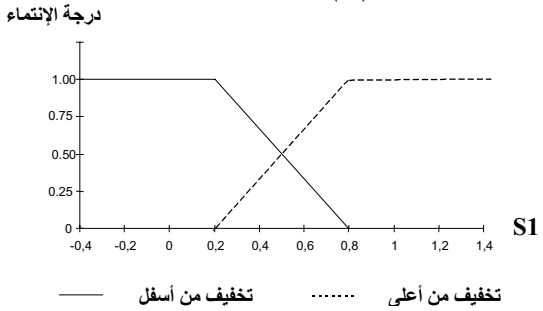
σ^2_{ges} = الإنحراف المعياري لأقطار المشجر قبل التخفيف.

ينعكس نوع التخفيف في ثابت التمايز. في الشكل (6.7) نتج عن التخفيف من أعلى قيمة ثابت تمايز تساوي 1.7 في حين نتج عن التخفيف من اسفل −0.74. نظراً لتعدد أنواع التخفيف في الواقع العملي، فإن قيم ثابت التمايز تتفاوت بشكل كبير (الشكل 6.7).



الشكل(6.7): تفاوت قيم (SI) في حالات: تخفيف من أعلى (sND)، تخفيف معتدل من اسفل (mND) وتخفيف ثقيل من أعلى (stND) وتخفيف بغرض الإسراع بالنمو (SW) (أخذت من قادو وستوبر، 1993).

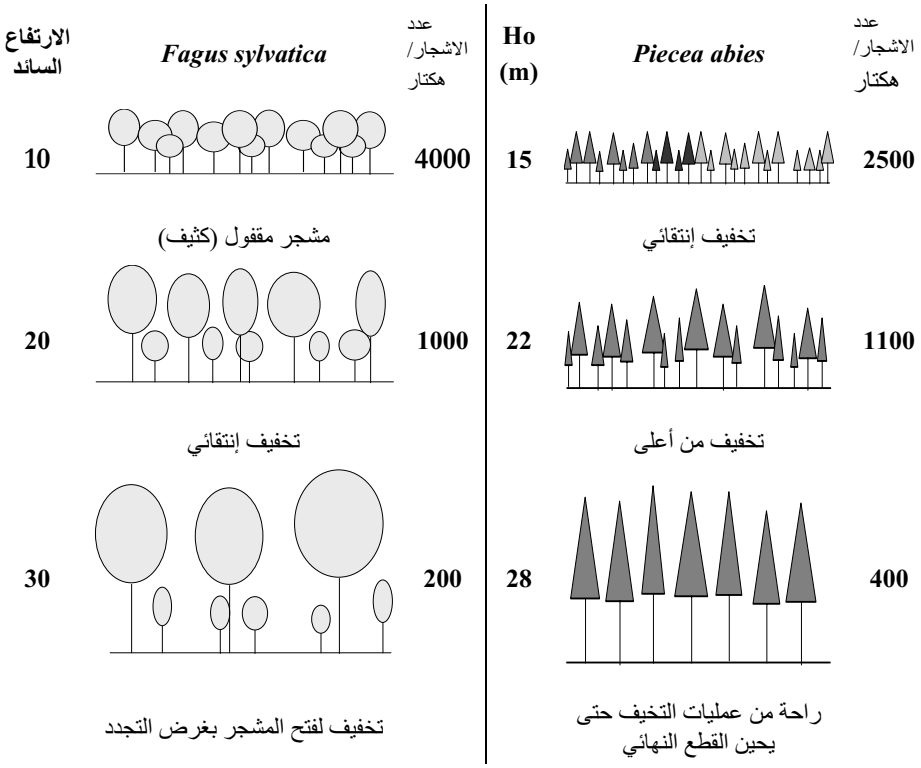
الشكل(6.7) يعرض المشكلة الأساسية التي تظهر عند تصنيف قيم (SI) إلى مجموعات. هنالك بعض القيم تكون مشتركة بين مجموعة وأخرى (لاتوجد خطوط قاطعة بين القيم). من الممكن وصف هذه العلاقة عن طريق ما يعرف بمعادلة الإنتماء والتي تحدد درجة إنتماء قيمة (SI) إلى مجموعة واحدة أو اكثر. الشكل (7.7) يوضح مثالاً لمعادلة إنتماء لقيمة (SI) والمجموعتين تخفيف من أعلى وتخفيف من أسفل.



الشكل (7.7): معادلة إنتماء لقيمة (SI) وعلاقتها بالتخفيف من أعلى ومن أسفل.

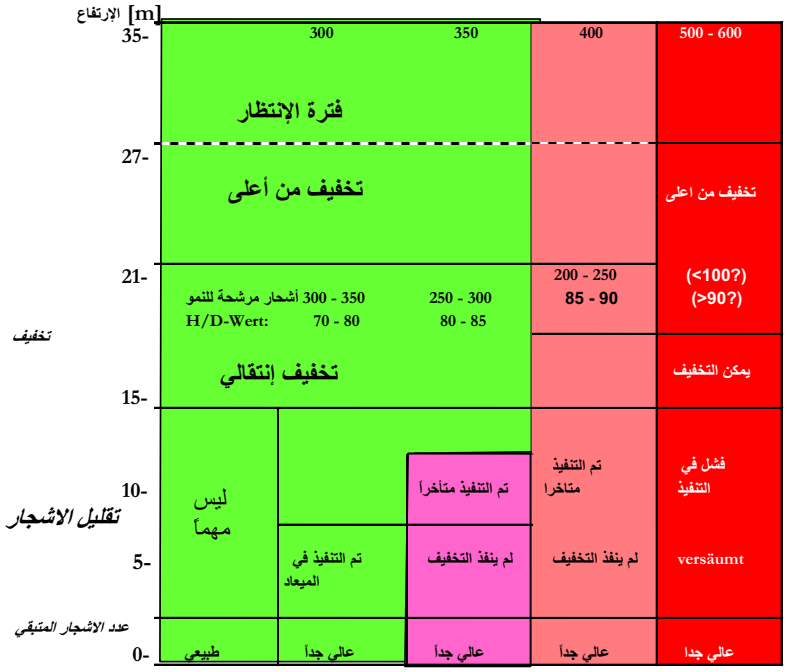
التطور المثالي للغابة

يمكن تطبيق ثوابت عمليات التخفيف المذكورة مع غيرها من الثوابت للمساعدة في وصف تطور مثالي لغابة ما، مثل برامج التخفيف وفقاً لجداول محددة (لبعض الأنواع الشجرية) أو المسافات البينية المنتظمة التي تنفذ في التخفيف الإنتقالي في الأنواع الشجرية عريضة الأوراق (الشكل 8.7).



الشكل (8.7): التطور المثالي لمشجري (Fagus sylvatica) و(Picea abies) وفقاً لجداول بوشل وهوس، 1987).

من السهل (نظرياً) التحكم في مثل هذه الصورة المثالية لتطور أي غابة. هنالك مفارقات كبيرة بين التطور النموذجي والتطور الحقيقي، حتى على مستوى المشاجر النقية ذات الأعمار المتساوية. لأسباب خارجة عن إطار التحكم قد تحدث مصاعب تجعل من تنفيذ عملية التخفيف امراً غير ممكن. بالإضافة للفكرة العامة الواضحة للتطور المثالي طويل الأمد. يجب أن تكون هنالك وسائل مساعدة لإتخاذ قرار للحالات الإستثنائية والحالات غير الطبيعية. الشكل (9.7) يوضح مثالاً لطريقة مساعدة لاتخاذ قرار في مشاجر صنوبر(*Picea abies*).



الشكل (9.7): وسيلة مساعدة لأتخاذ قرار لمشاجر صنوبر (Picea abies) (أخذت من جوهان وبولنشوتس، 1981).

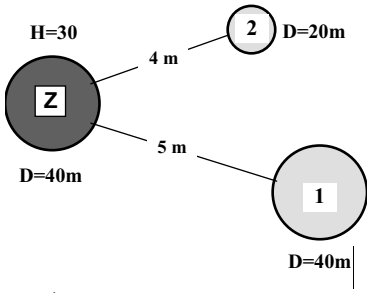
تمتاز هذه الطريقة بأنها تضع في الإعتبار عدة بدائل لنقطة البداية وتبني على كل بديل خيوط التطور المستقبلي المقترح للمشاجر، ومن ثم تؤدي إلى التدخل التالي (بالتخفيف أو القطع). من المحاسن الرئيسية لمثل هذه الطريقة أن الحالة الإستثنائية لا يتم وصفها بمعزل عن حالة التغير ولكنها تؤخذ في إطار إرتباط طول الأمد.

المسافات البينية الحرجة والإنتماء.

في عملية التخفيف الإنتقائي الموجهة في الأساس لمصلحة الأشجار المرشحة لمواصلة النمو حتى بلوغ الهدف الإداري ويرمز لها ب (Z)، يتم تحديد إطار لأشجار المستقبل ثم تتاح لها المساحات اللازمة للنمو الجيد بشكل منتظم لضمان إستقرارها والتطور الجيد لتيجانها.

يعتمد عدد الأشجار التي يجب أن تقطع لمصلحة الشجرة (Z) المرشحة لمواصلة النمو حتى النهاية على صفات هذه الأشجار (أقطارها، إرتفاعاتها، إلخ) وأيضاً على المساحات البينية وصفات الأشجار المنافسة. لوصف كيفية التخفيف في مثل هذه الحالات بدرجة محددة من الدقة، يجب معرفة صفات الشجرة (القطر، الإرتفاع، التاج،...)، التي يمكن عن طريقها حساب مايعرف بالمساحة الحدودية (Boundary distance)، المعادلة (4.7 والشكل 10.7) يوضحان ذالك.

$$GD_{iz} = \frac{H_z}{A} \cdot \frac{D_i}{D_z} \qquad (4.7)$$



الشكل (10.7): المسافة بين شجرة مرشحة (Z) وجارتين من الممكن أن تصبحا منافستين. (GD_{1z}= 6متر، GD_{2z}= 3متر).

تعتمد المسافة الحدودية (z) الشجرة (Z) ذات الإرتفاع (H_z) والقطر (D_z) وأيضاً الشجرة التي من المحتمل أن تصبح منافسة (i) على ما يعرف بمقياس درجة (قوة) التخفيف (A). تقطع الشجرة المنافسة عندما تكون المسافة بينها وبين الشجرة المرجعية (Z) والتي يرمز لها ب (E_{iz}) اقل من المسافة الحدودية (Gdiz). كلما زادت قيمة (A)، كلما قلت المسافة الحدودية وكلما قلت درجة التخفيف.

مثال: الشكل (10.7) يوضح المسافات من شجرة (Z) إلى شجرتين مجاورتين من الممكن أن تصبحا منافستين، أقطارهما عند مستوى الصدر معروفة. إذا كانت قيمة (A) تساوي 5 والمسافة بين الشجرة (Z) والشجرة 1 تساوي 5 أمتار وبينها وبين الشجرة 2 تساوي 4 امتار. المسافات الحدودية التي تم حسابها تساوي 6 أمتار للشجرة 1 و3 أمتار للشجرة 2. بهذا فإن الشجرة 2 توجد داخل المسافة الحدودية ولهذا يجب إزالتها، في حين أن الشجرة 2 تبق موجودة لأنها خارج المسافة الحدودية.

إذا علمت مساحة المشجر وعدد الأشجار وصفاتها وإحداثياتها فمن الممكن معرفة تأثير كل شجرة داخل المشجر على الأشجار الأخرى. يمكن حساب ما يعرف بمساحة النمو الضائعة بدلالة ضغوط الأشجار المجاورة على الشجرة المرجعية بعد وزنها بالإرتفاعات.
يتكون المنهج الحسابي الذي تتحدد بموجبه الأشجار التي يمكن أن تقطع في عملية التخفيف في كل صف قطر، من ثلاث خطوات:
أ). مساحة النمو المحسوبة للأشجار المفردة هي دالة في القطر عند مستوى الصدر، مجموع مساحات النمو لكل الأشجار تساوي مساحة المشجر (بالمتر المربع).
ب). مساحة النمو الضائعة للشجرة (i) دالة في مساحة التداخل الموزونة بإرتفاع الأشجار.
ج). الشجرة الأولى التي تقطع في عملية التخفيف هي الشجرة التي تحتل الجزء الأكبر من مساحة النمو الضائعة.
يتم تحديد نوع التخفيف عن طريق الثوابت (b_1) و(b_2). وتعني القيمة الموجبة لهذين الثابتين أن تقطع الأشجار الصغيرة (الضعيفة) في الأجزاء الكثيفة داخل المشجر. عندما تكون قيم الثابتين أعلاه سالبة، يعني هذا أن كل أو معظم الأشجار التي تقطع تكون من الأشجار السائدة.

3.7 وصف عمليات التخفيف عن طريق ثوابت تركيبة المشجر

تساعد مقاييس تركيبة المشجر (التي ترتكز على توزيع العلاقات بين الاشجار المفردة المتجاورة) في التقويم التفصيلي لعمليات القطع. لقد وردت تفاصيل مقاييس تركيبة المشجر في الفصل الرابع من هذا الكتاب (توزيع المسافات بين الاشجار، درجات الإختلاط، التمايز في الأبعاد، إلخ). يمكن عن طريق المقارنة بين ثوابت تركيبة المشجر قبل وبعد التخفيف الحصول على وصف تفصيلي لعمليات القطع، وبالتالي إستنباط بدائل قطع الأشجار مفردة بناءاً على خصائص التركيبة، إذ يمكن على سبيل المثال وضع كل شجرة في صف التركيبة المناسب بعد معرفة التفاصيل عن درجة الإختلاط وقيم التمايز بالنسبة للقطر. بتقسيم هذين المتغيرين إلى أربعة صفوف يتم الحصول على 16 صفة تركيبية (قادو، 1997، الجدول 2.7).

Picea abies						*Fagus sylvatica*					
المشجر بعد التخفيف		*M*				المشجر قبل التخفيف		*M*			
		0	**0.33**	**0.67**	**1**			**0**	**0.33**	**0.67**	**1**
T	**0 - 0.3**	0.00	0.32	0.15	0.00	*T3*	**0 - 0.3**	0.19	0.08	0.04	0.00
	0.3-0.5	0.04	0.13	0.00	0.00		**0.3-0.5**	0.07	0.07	0.04	0.01
	0.5-0.7	0.00	0.02	0.09	0.02		**0.5-0.7**	0.04	0.06	0.07	0.01
	0.7-1.0	0.00	0.06	0.11	0.06		**0.7-1.0**	0.13	0.07	0.08	0.03
التخفيف		*M*				التخفيف		*M*			
		0	**0.33**	**0.67**	**1**			**0**	**0.33**	**0.67**	**1**
T	**0 - 0.3**	0.00	0.25	0.00	0.00	*T*	**0 - 0.3**	0.20	0.20	0.00	0.00
	0.3-0.5	0.00	0.75	0.00	0.00		**0.3-0.5**	0.20	0.20	0.20	0.00
	0.5-0.7	0.00	0.00	0.00	0.00		**0.5-0.7**	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.7-1.0	0.00	0.00	0.00	0.00		**0.7-1.0**	0.00	0.00	0.00	0.00

الجدول (2.7): التوزيع النسبي لتكرارات الأختلاط (M) وتمايز الأقطار (T) في مشجر مختلط من النوعين (Picea abies) و(Fagus sylvatica) للمشجر قبل التخفيف والأشجار التي قطعت في التخفيف (أخذ من قادو، 1997).

تتيح تكرارات صفوف تركيبة المشجر قبل التخفيف والجزء المقطوع في عملية التخفيف الفرصة لمعرفة الأشجار التي يفضل أن تقطع، وذلك بناءاً على إنتمائها إلى وصف تركيبة محددة. من الممكن حساب أفضلية القطع بإستعمال المعادلة الآتية:

$$PR_{ij} = \frac{p_{ij}}{P_{ij}} \qquad (8.7)$$

حيث:

PR_{ij} = أفضلية وصف التركيبة(ij).

P_{ij} = الجزء النسبي الذي تمثله الأشجار المقطوعة في وصف التركيبة (ij).

P_{ij} = الجزء النسبي الذي تمثلة كل الاشجار في وصف التركيبة (ij).

مثال: يمثل صف تركيبة بمشجر *Picea abies* 13% من المشجر الكلي وتبلغ درجة الإختلاط بهذا الصف 0.33 (بمعني أنه في كل 3شجرات مجاورة للشجرة المرجعية توجد شجرة *Fagus sylvatica* (واحدة) ويقع التمايز القطري بين (1: 1.4) و(1:2) تقع 75% من الأشجار التي ستقطع عند التخفيف في هذا الصف. المطلوب حساب أفضلية القطع للصنوبر.

الحل: PR_{ij}= 0.13/0.75 =5.77 وتعتبر قيمة عالية.

مازاد عن شجرتين مجاورتين من النوع (*Picea abies*) مقابل كل شجرة *Fagus sylvatica* (M= 0.33)) يتم قطعه، وفي هذه يفضل قطع الأشجار الكبيرة (الأقطار).

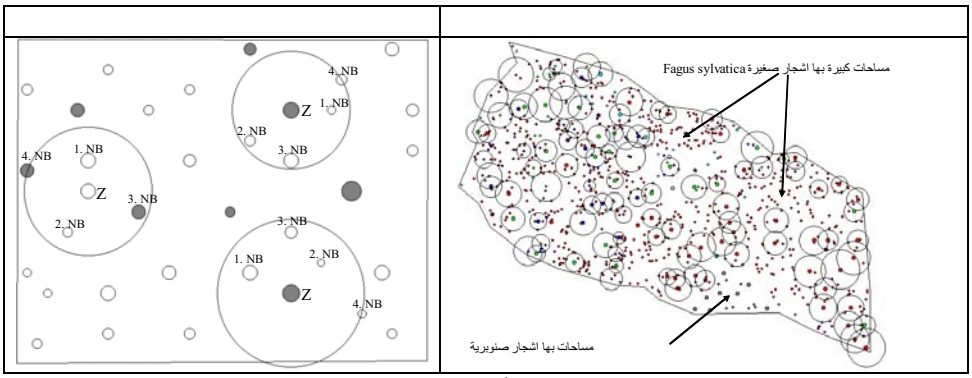
تحليل عملية التخفيف (الشلخ) عن طريق مجموعات الأشجار المتجاورة

يقصد بمجموعات الأشجار المتجاورة كل الأشجار التي لها علاقة بإتخاذ القرار الخاص بكيفية عملية التخفيف وهي الأشجار المرجعية والأشجار المجاورة لها. إقترح البرت (1999) أربعة طرق مختلفة لإختيار مجموعة أشجار متجاورة (الجدول (3.7).

الدوافع للتخفيف		
ناتج التخفيف	**المشجر بعد التخفيف**	
مجموعة الأشجار المتجاورة مع الجارات الأربعة في ناتج التخفيف.	مجموعة الأشجار المتجاورة مع الجارات الأربعة في المشجر بعد التخفيف.	الجارة الاقرب : بدائل الإختيار الجارة المنافسة
الأشجار المنافسة التي تجاوزت المسافة الحدودية في مجموعة الأشجار المجاورة (ناتج التخفيف).	الأشجار التي تجاوزت المسافة الحدودية في مجموعة الأشجار المجاورة في المشجر بعد التخفيف.	

الجدول (3.7): أربعة بدائل لإختيار مجموعة أشجار مجاورة على اساس الدوافع للتخفيف وبدائل الإختيار.

هنالك عدة بدائل وكذلك يمكن توسيع الدوافع لعملية التخفيف. الشكل (11.7) يوضح مشجراً ومجموعة أشجار متجاورة والأشجار الأربعة المجاورة لكل شجرة مرجعية (الدوائر في الأشكال توضح ذلك).



الشكل (11.7): إلى اليسار قطعة بها مجموعة أشجار متجاورة قبل عملية التخفيف ودافع إختيار لإشجار مجاورة (أربعة أشجار). ألى اليمين: مجموعات أشجار متجاورة داخل مشجر (تحتوي المجموعات على أشجار مرشحة لمواصلة النمو (Z) وجاراتها الأربعة ممثلة بدوائر (اخذت من ألبيرت، 1999)).

من الواضح أن المجموعات الشجرية المتجاورة لم تتضمن اجزاء واسعة من المشجر وهى عبارة عن مساحات أو اجزاء من المشجر بها اشجار صغيرة، في حين أن المجموعات الشجرية المتجاورة قد شملت كل الجزء الشمالي الغربي من المشجر. لم تتركز عمليات التخفيف في المجموعات الشجرية المتجاورة فحسب، بل شملت أجزاء اخرى داخل المشجر.

تصميم نماذج رياضية بناءاً على نظم (أسس) محددة

مع تطور التصورات النظرية وجدت التطبيقات المبنية على نظم محددة مجالاً عند تصميم نماذج رياضية للتخفيف. تتكون العبارة المبنية على نظام محدد (Implication) من شرط ونتيجة (Condition and conclusion):

توفر الشرط ⟵ نتيجة (خلاصة)

عندما يتحقق الشرط تحدث النتيجة. من الشروط: حالة المشجر، خصائص المشجر وخصائص تركيبة المشجر. والخلاصات هي مجموعة نتائج وقرارات أو بصورة مبسطة هي معلومات في شكل خبرات عملية نوعية (ليس كمية). مثلاً إذا بلغت المسافة النسبية بين الأشجار أقل من 15% فيجب القيام بعملية تخفيف فوراً. عبر نظام محدد (او لآئحة أو قانون) يتم تعريف العلاقة بين الأشياء. التعبير الرياضي.

$$S = \frac{\sqrt{10\,000 / N}}{H_0}$$

يمثل علاقة بين أشياء محددة. في هذا المثل فإن الأمر يتعلق بثلاثة أشياء: كثافة المشجر (S) ومتوسط المسافة بين الأشجار ($\sqrt{10\,000 / N}$) والإرتفاع (H_0). الشرط اللازم توفره هو العلاقة بين الأشياء التي يمكن أن تكون معادلات رياضية أو جمل بسيطة تصف تجارب أو خبرات نوعية.

$$\begin{pmatrix} \frac{\sqrt{10000/N}}{H_0} < 0.15 \\ und\ Df\ nicht\ riskant \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} entnehme \left\{ N - \frac{10000}{0.20^2 H^2} Bäume/ha \right\} \\ im\ Rahmen\ einer\ Niederdurchforstung \end{bmatrix}$$

عندما تكون المسافة النسبية بين الأشجار أقل من 15% وليس هناك خطورة من تنفيذ عملية التخفيف، فيجب تقليل عدد الأشجار من خلال تخفيف من أعلى لدرجة تزيد المسافة النسبية بين الأشجار إلى 20%. يمكن حساب عدد الأشجار الذي يطابق كثافة شجرية معينة عن طريق المعادلة.

$$N = \frac{10000}{S^2 \cdot H_0^2} \qquad (6.7)$$

يمكن عن طريق عمليات التخفيف الإنتقائية (التي تهدف إلى تحديد أشجار مستقبلية معينة) إختيار الأشجار (Z) المرشحة للنمو المستقبلي وأيضاً القرارات المتعلقة بعمليات التخفيف. (يقع قرار رجل الغابات بإختيار الأشجار المرشحة تحت طائلة نظام تقييم آخر مبني على أساس خصائص الأشجار، وهذا يختلف عن إختيار الأشجار التي يمكن قطعها أثناء عملية تخفيف إنتقائي. الشكل (12.7) يوضح الأشجار المرشحة لمواصلة النمو بناءاً على فكرة إتخاذ القرار بناءاً على الوصف.
يعتبر التنبؤ بالأشجار المرشحة للبقاء مثالاً تطبيقياً للنماذج الرياضية الخطية المعممة. في عملية إختيار الأشجار المرشحة للبقاء يمكن الإعتماد على مختلف الصفات المساعدة بالمشجر، وتقوم الفكرة دائماً على واحد من إحتمالين: أما أن تكون تلك الشجرة مرشحة للبقاء أو لا تكون. لإختيار الشجرة (i) من المجتمع الشجري (Z) لتكون مرشحة للبقاء يستعمل المتغير العشوائي الثنائي (Y_i).

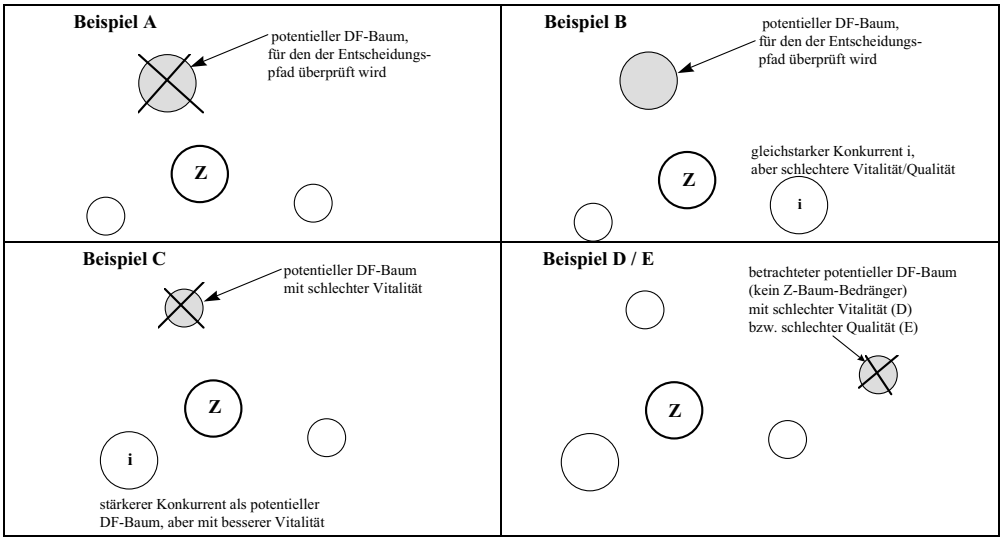
$$Y_i = \begin{cases} 1 & \text{Baum i wird als Z - Baum ausgewählt mit } P(Y_i = 1) = \pi_i \\ 0 & \text{Baum i wird nicht als Z - Baum ausgewählt } P(Y_i = 0) = 1 - \pi_i \end{cases}$$

تبعاً لذلك (Y_i) ذات توزيع ثنائي (Binomail) للمتغير العشوائي.
(لا تحسب القيمة للمتغيرات التي Generalized linear model في النموذج الرياضي الخطي المعمم) مباشرة، وإنما يتم تحويلها عن طريق ما يعرف بمعادلة ربط القيم المتوقعة: توضح خصائص الشجرة.

$$g(\pi) = \log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j$$

حيث أن (βj) هو ثابت النموذج الرياضي (x_j) يساوي المتغيرات التي توضح خصائص الشجرة. معادلة ربط التوزيع الثنائي هي معادلة الربط اللوغريثمية الآتية: ($g(\pi) = \log\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right) = \sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j$)، حيث ($\log(\pi)$) هو اللوغريثم الطبيعي ل (π). يتم الحصول على إحتمال النجاح (إحتمال ترشيح شجرة لتواصل النمو) بحل المعادلة الآتية : $\pi = \frac{\exp\left(\sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j\right)}{1 + \exp\left(\sum_{j=1}^{k} \beta_j x_j\right)}$

تؤثر معادلة الربط هذه في الإحتمالات (π) لأي قيم (x) في المدى من 0 إلى 1. الشكل (12.7) يعرض مثالاً تطبيقياً لهذه الطريقة التي إستعملها البيرت (1999).

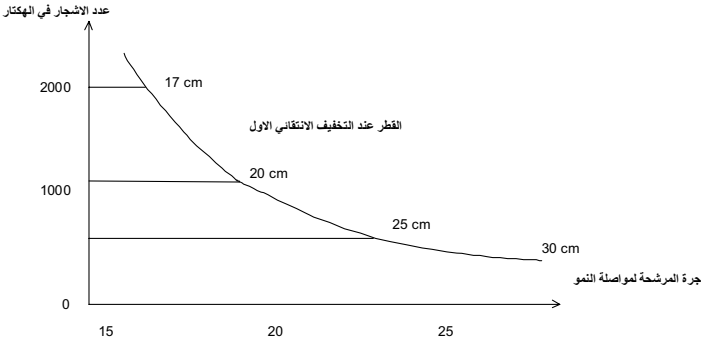


الشكل (12.7): إختيار الأشجار التي تقطع في عمليات التخفيف مبنية على اساس شجرة القرار وخمسة أمثلة للقطر (أخذت من ألبيرت، 1999).

التأكد من الحاجة للتخفيف

لتقييم الحاجة للتخفيف توجد ثلاثة إحتمالات اساسية: أما أنه يجب القيام بعملية تخفيف (قطع): يعني هنالك حاجة للتدخل الفوري أو انه يمكن القيام بعملية تخفيف الحالي أو في المستقبل القريب.

من المهم جداً في هذا الأمر الأسس التي تحدد مقدار الحاجة للتدخل. إعتماداً على جدول الإنتاج للأشجار المنتقاة (المرشحة لمواصلة النمو لتحقيق الهدف المحدد) الذي صممه كليدكة (1992) تمكن أبيتز (1994) من إستنباط منهج يتم بموجبه تحديد النقطة الزمنية والقطر عند مستوى الصدر لأول شجرة مرشحة لمواصلة النمو (Z) ومن ثم بداية التخفيف الإنتقائي بالنسبة للنوع الشجري (*Picea abiea*). الشكل (13.7) يوضح ذلك.



الشكل (13.7): النقطة الزمنية والقطر عند مستوى الصدر للتخفيف الإنتقائي المؤسس على اول شجرة مرشحة للنمو المستقبلي، ومن ثم بداية التخفيف الإنتقائي في النوع الشجري (Picea abies) وقد أسس على جدول الإنتاج للأشجار المنتقاة من تصميم كليدكة، 1992).

كلما قل عدد الأشجار، كلما تاخرت عملية التخفيف الإنتقائي لمصلحة الأشجار المرشحة لمواصلة النمو، وكلما إرتفعت قيم أقطار الأشجار والقيم التسويقية للأنتاج من عمليات التخفيف الأولى.

بإختصار: يمكن ملاحظة أنه بإختيار أساس محدد لتقييم لحاجة لإتخاذ القرار، فإن هذا الأساس يأتي دائماً في المقدمة. هنا يجب الأخذ في الإعتبار أن التخفيف يوجه (في العادة) لتحقيق عدد من الأهداف، وأن هذه الأهداف تختلف من مشجر إلى آخر.

التنبو بالتخفيف إعتماداً على حالة محددة

على العكس من التخطيط الفلاحي المثالي، الذي يهدف إلى خلق صورة نموذجية بعيدة، فإن التخطيط إعتماداً على الحالة المحددة يقوم على تلك الحالة فقط في المشجر الغابي الحقيقي الذي يتغير ببطء. يعتبر الزمن الطويل سمة أساسية لديناميكية الغابة، فمثلا تحول غابة (بشكل طبيعي) من غابة نقية إلى غابة مختلطة يحتاج إلى زمن طويل جداً.

للمشاجر الغابية الحقيقية دائماً عدة طرق للتطور، حيث توجد عدة بدائل لعمليات التخفيف الممكنة. يعتبر التخطيط الفلاحي المرتبط بحالة محددة عملية إيجابية، لأنه يسمح بالتطور بناءاً على عدة بدائل تعرف بعمليات التخفيف المتعددة. تعتبر تبعات عمليات التخفيف نتيجة حتمية لعمليات فلاحية لفترة زمنية محددة.

بالإضافة لإحتمالات التطور وبدائل التخفيف، فإن الإعتماد على الأفراد (الذين ينقذون البرنامج) يجعل من تنفيذ المنهج المحدد والتنبؤ بالتخفيف المستقبلي أمراً عسيراً، إذ أنه بإختلاف الأفراد الذين ينفذون عمليات تخفيف لنفس الهدف تختلف أنماط توزيع الأشجار. تعتبر مشكلة إعتماد تطور الغابة على أفراد، من المسائل التي لم تنل قدراً وافراً من البحوث حتى الآن وحالياً تجرى سلسلة من البحوث في هذا الإنتماء.

يتلخص الهدف من هذه الأعمال في إستنباط معايير واضحة لتحديد التوافق بين تنفيذ الفرد لتوجيهات متماثلة (مثلاً تمييز مشجر لتخفيف إنتقائي). هنالك أمر آخر يجب أخذه في الإعتبار مستقبلاً، وهو التباين (أو الإختلاف) الشخصي المتوقع عندما يقوم نفس الشخص بتمييز نفس المشجر عدة مرات متتالية. لقد كان هذا الأمر من اساسيات بحث قام به كاله (1995) وقد توصل من خلال بحثه إلى توافق جيد جداً من خلال ثلاثة عمليات تخفيف تم تطويرها حاسوبياً بفرق شهر بين العملية والأخرى. إن العدد الكبير للتركيبات الغابية المحتملة يجعل وضع أسس عامة يعتبر أمراً صعباً في.

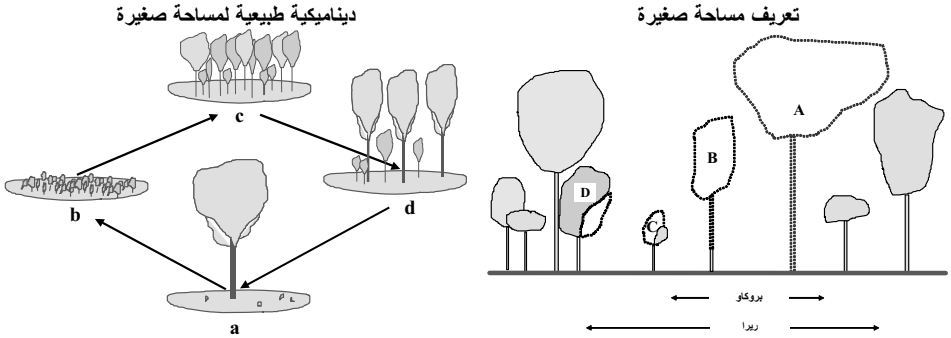
نتيجة للفراغات التي لا تزال موجودة في اساسيات البحث، فإنه لا يمكن التنبؤ بتأثيرات عمليات التخفيف على تطور الغابة. من هنا فإنه لا يمكن الحديث عن تطور أمثل للغابة بناءاً على تعريف محدد، مما دفع عدد كبير من الكتاب الى الدعوة لتأسيس ما يعرف بقاعدة **المنهج الفلاحي الحر**، وترمي هذه القاعدة لتوسيع مساحة إتخاذ القرار للذين يمارسون مهنة الغابات عملياً.

8. النماذج الرياضية للمساحات الصغيرة

من الخيارات الخاصة للنماذج الرياضية للأشجار المفردة التي تعتمد على معرفة مواضع الأشجار داخل المشجر، ما يعرف بالنماذج الرياضية للمساحات الصغيرة (تعرف أيضاً بالنماذج الرياضية التتابعية). تتكون النظم البيئية الغابية الشاسعة من مساحات أصغر، من هنا فإن الإنسان يتوصل للفهم الكلي لهذه النظم عن طريق تحليل هذه المساحات الصغيرة. هنالك عدد من النماذج الرياضية للمساحات الصغيرة وردت في أعمال بوتكين وآخرون (1972) وشوقارت (1984) وكيناست وكون (1989) وبوتكين (1993). يتعلق الأمر في هذه الأعمال (جزئياً) بمحاولة فهم المجريات في الغابات الطبيعية التي لا تخضع لأي نوع من أنواع المعاملات الفلاحية.

الشكل (1.8) يوضح تصورا للتطور الديناميكي الطبيعي لمساحة صغيرة في مشاجر كافور مختلطة بأستراليا.

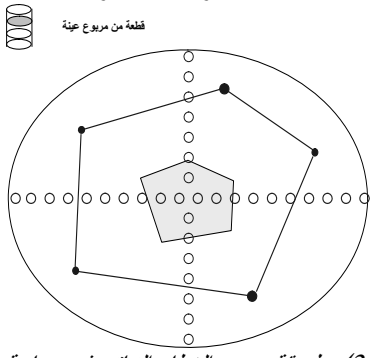
يمكن تمييز المساحة الصغيرة بأربعة مراحل: سيادة أشجار كبيرة العمر في المساحة الصغيرة (a) ومرحلة تجدد (Regeneration) بعد سقوط الأشجار الكبيرة (b) والنمو والتمايز نتيجة للمنافسة على البقاء (c) ومرحلة التقديم في العمر والسعي نحو السيادة (d).



الشكل (1.8): إلى اليسار: تصور للتطور الديناميكي الطبيعي لمساحة صغيرة في مشجر كافور مختلط بأستراليا. إلى اليمين: مساحة صغيرة (تخيلية) مكونة من عدة مساحات أصغر.

هنالك أختلاف وتعرف المساحة الصغيرة. في الشكل (1.8) سقطت الشجرتان (A) و(B) والحقتا أضراراً بالأشجار (C) و(D). يرى بروكاو (1982) أن الحد الخارجي للمساحة الصغيرة يتحدد عبر فتحة في الغطاء التاجي، ويتم تحديد المحيط الخارجي لهذه الفتحة عن طريق تيجان الأشجار التي ماتزال حية، أما ريرا (1982) فيعرف المساحة الصغيرة على انها الفتحة في الغطاء التاجي التي تسمح بالتحديد.

الشكل (2.8) يوضح تصوراً لمساحة صغيرة محددة عبر غطاء نباتي إرتفاعة 20 متراً ومساحة صغيرة محددة عبر نقاط على مستوى ملامسة سيقان الأشجار السائدة للأرض.



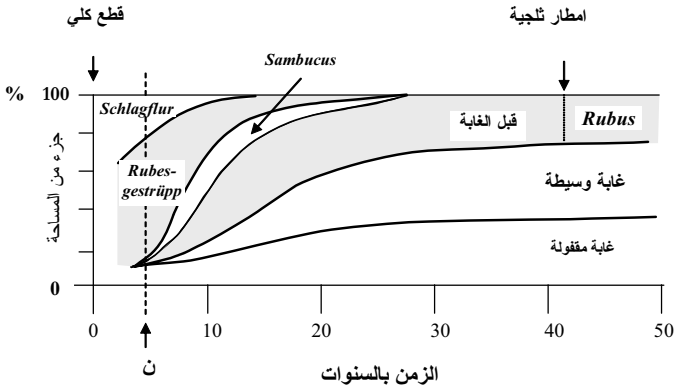
الشكل (2.8): طريقة حصر الغطاء النباتي في مساحة صغيرة.

التجدد Regeneration

يمر تصميم النماذج الرياضية للتجدد بمراحل مختلفة: من الزهرة حتى البذرة وختاماً حتى البادرة التي يتكون منها النمو الداخلي (الشجيرات الصغيرة داخل المساحة التي لم تصل الحد الادنى للقطر عند مستوى الصدر الذي تم تحديده ليبدأ من القياس) والتي تتطور لتصبح شجيرات قابلة للأخذ في الإعتبار عند القيام بأعمال قياسات.

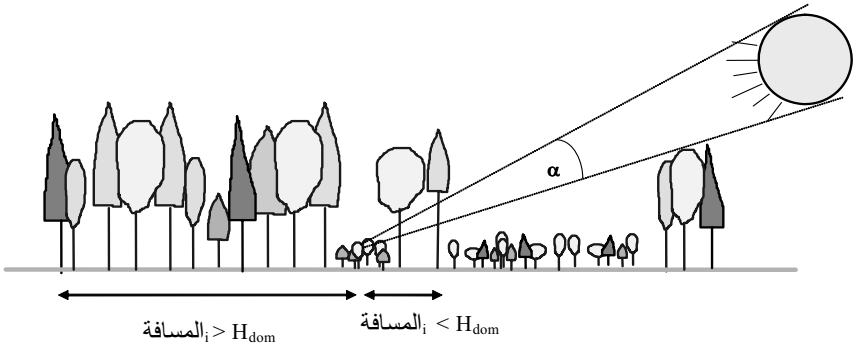
عناصر العملية (المرحلة)	نوع النموذج
تكوين الزهور، التلقيح، تكوين الثمار، نضج البذور وإنتشارها، الإنبات	النماذج الرياضية داخل التكوين الاولي
من البذرة وحتى الإرتفاع إلى مستوى الصدر	النماذج الرياضية للتكاثر
من لحظة وصول النبات الى إرتفاع مستوى الصدر حتى لحظة وصوله إلى الحد الادنى الذي الذي يؤخذ في الإعتبار عند إجراء قياسات	النماذج الرياضية للنمو الداخلي

أن تكوين الزهور والتلقيح وتكوين الثمار والبذور وإنتشارها والإنبات عناصر مهمة في ديناميكية المساحات الصغيرة. حاول الأنسان نقل (نسخ) هذه العمليات بمساعدة التوزيعات المعروفة لإنتاج البذور وإتجاه الرياح والظروف المناخية وعلى اساس الظروف المعروفة التي تسود في المنطقة الغابية.
قام جيوجور وسايدلنج (1997) بإجراء بحوث على التطور الطبيعي النباتي في منطقة غابية كانت قد قطعت كلياً وقد كانت تجريتهما على قطعة أرض مساحتها هكتاراً واحداً، وقد قاما بمتابعة التطور النباتي فيها لمدة خمسين عاماً (الشكل 3.8).
في العامين الأول والثاني سيطرت الحشائش والغطاء النباتي التحتي (Ground vegetation) ثم تحولت السيطرة للشجرات الصغيرة حتى العام العاشر تقريباً. من العام العاشر حتى الخامس عشر سيطرت شجرات أكبر حجماً ثم بعد ذلك ظهرت ثلاثة طبقات من الأشجار: طبقة عليا وأخرى وسيطة وثالثة دنيا بنسب متساية تقريباً وبدرجة كبيرة من التداخل.



الشكل (3.8): تطور الغطاء النباتي في منطقة قطع كلي.

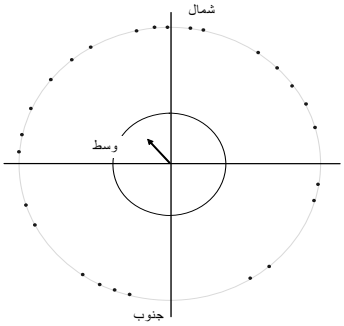
إهتم عدد من الباحثين بتصميم نماذج رياضية لنموالتجدد الطبيعي في ظروف إشعاعات مختلفة. يتأثر إرتفاع التجدد (أي النباتات الصغيرة) بالإشعاع الضوئي المباشر وغير المباشر مع مراعاة مختلف مؤشرات التنافس التي تصف مناطق التأثير والمناطق المتأثرة بالظل في الفراغات التي يوجد فيها التجدد. بالإضافة إلى الإشعاع الداخل عبر حافة المشجر (عندما تكون المسافة لحافة المشجر تساوي ضعف الإرتفاع السائد أو أكثر). في هذه الحالة يتم تحديد زاوية الإشعاع (α) عن طريق إرتفاع المشجر والمسافة إلى حافة المشجر. يتم حساب ظل الزاوية (α) كمقياس لكل الإشعاع الإضافي المتسلل (الشكل 4.8).



الشكل (4.8): تصميم نوذج رياضي للإشعاع المتاح للتجدد (أخذ من جوسلر وهازيناور، 1997).

موت الأشجار

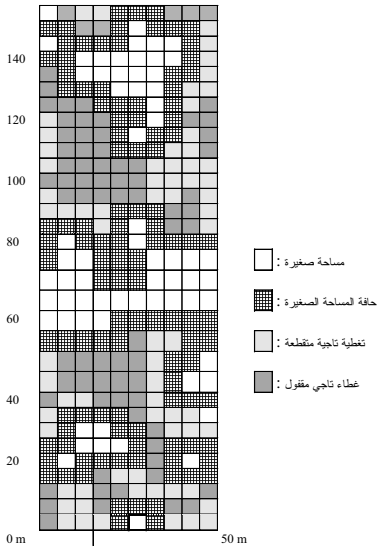
إن فهم عمليات الموت الطبيعي للأشجار والطرق المستخدمة لمعرفتها تعتبر من اصعب مهام بحوث تصميم النماذج الرياضية في علم نمو الغابات. تشكل المعلومات عن إتجاهات سقوط الأشجار اساساً مهماً لتصميم النماذج الرياضية لديناميكية المساحات الصغيرة. الشكل (5.8) يوضح إتجاهات سقوط 35 شجرة في مشجر ما. يشير الإتجاه من وسط المساحة إلى إتجاه شمال الشمال الغربي. بعد تحليل هذا الإتجاه عن طريق إختبار الإحتمالات إتضح أن أثر القطع في هذا الإتجاه (أنظر المثال) لا يختلف عن القطع في أي إتجاه آخر. في دراسة أخرى أجراها ليو وهايتيبورن (1991) إتضح أن 62% من الأشجار الميتة (صانعة الفراغات) في مشجر طبيعي من أشجار الصنوبر قد سقطت في الإتجاه الجنوبي الغربي والجنوبي الشرقي.



الشكل (5.8): إتجاهات سقوط 35 شجرة في مشجر

في معظم النماذج الرياضية للمساحات الصغيرة يتم تقديم العمليات الحسابية لديناميكية المشجر كإتجاه مستقل لكل مساحة صغيرة على حدة. لكل مساحة صغيرة نقطة إبتداء خاصة بها، حيث يتم تحديد عدد الأشجار والتوزيع داخل المساحة حسب إحداثيات كل شجرة والنوع الشجري والقطر عند إرتفاع مستوى الصدر وإرتفاع الأشجار وإرتفاع التيجان، إلخ... البرنامج الحاسوبي التالي (gap.pas) يوضح الخطوات الحسابية لغابة بها 9 مساحات صغيرة، مساحة كل منها 100 متراً مربعاً.

إعتماداً على الخبرة في هذا المجال والإفتراضات المعقولة، وبمساعدة برامج حاسوبية مناسبة، يمكن حساب التطور إبتداءاً من أي حالة يكون عليها المشجر، سواء كانت إفتراضية أو حقيقية. كمثال لذلك يمكن الإشارة إلى التشكيلة المكانية التي صممها ناميكاوا وكاواي (1998) في غابة مختلطة من أنواع شجرية ذات أوراق إبرية وأخرى ذات أوراق عريضة في هوكايادو باليابان (الشكل 6.8).



الشكل(6.8): تشكيلة مانية لمراحل تطور مختلفة في غابة مختلطة في هوكايادو باليابان (أخذت من ناميكاوا وكاواي، 1998).

Literatur

Aguirre, O., Hui, G. Y., Gadow, K. v. u. Jimenez, J., 2003: Comparative Analysis of Natural Forest Sites in Durango, Mexico. *Forest Ecology and Management* (im Druck).

Aguirre, O., Kramer, H. u. Jiménez, J., 1998: Strukturuntersuchungen in einem Kiefern-Durchforstungsversuch Nordmexikos. AFJZ 169 (12): 213-219.

Akça, A., Gadow, K. v., Mench, A., Mann, P., Pahl, A. u. Setje-Eilers, U., 1994: Überprüfung des Formquotienten q_7 (d_7/BHD) in der Bundeswaldinventur für die Hauptbaumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer im landeseigenen Wald Nordrhein-Westfalens. Project report: 23 S.

Albert, M., 1998: Analyse der eingriffsbedingten Strukturveränderung und Durchforstungsmodellierung in Mischbeständen. Diss., Fak. f. Forstw. u. Waldökologie., Univ. Göttingen: 178 S.

Albert, M., 1997: Positionsabhängige Einzelbaummodellierung am Beispiel des Simulationsansatzes von Hasenauer. Unveröffentlichtes Manuskript, Institut für Forsteinrichtung u. Ertragskunde, Universität Göttingen: 6 S.

Albert, M., 1994: Erhebung von Strukturinformationen in einem Buchen-Edellaubholz Mischbestand. Diplomarbeit am Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde, Universität Göttingen. 109 p.

Alder, D., 1980: Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Estudios FAO. Montes 22/2. Roma.

Alisov, B. P., Drosdow, O. A. u. Rubinstein, E. S., 1956: Lehrbuch der Klimatologie. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Altherr, E., 1963: Untersuchungen über Schaftform, Berindung und Sortimentsanfall bei der Weißtanne. AFJZ 134 (5/6): 140-151.

Altherr, E., 1971: Wege zur Buchen-Starkholzproduktion. Bericht zur 15. Hauptversammlung des Baden-Württembergischen Forstvereins: 123-127.

Alvarez, J.-G., 1997: Analisis y caracterizacion de las distribuciones diametros de *Pinus Pinaster* Ait en Galicia. Diss. Univ. Santiago de Compostela.

Amateis R. L., Burkhart H. E. u. Burk T. E., 1986. A ratio approach to predicting merchantable yields of unthinned loblolly pine plantations. For. Sci. 32: 187-296.

Assmann, E., 1961: Waldertragskunde. Bayrischer Landwirtschaftsverlag, München.

Assmann, E., 1953: Zur Bonitierung süddeutscher Fichtenbestände. AFZ 10: 61-64.

Assmann, E. u. Franz, F., 1963: Vorläufige Fichtenertragstafel für Bayern. Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt München. 2. Auflage 1972. 50 S.

Atkins, P. W., 1987: Physikalische Chemie. Verlag VCH, Weinheim.

Avery, T.E., Burkhart, H.E., 1994. Forest measurements, 4th Edition, McGraw-Hill.

Badoux, E., 1939: De l'influence de divers modes et degrés d'éclaircie dans les Hetraies pures. Mitt. Schweiz. Anst. f. d. forstl. Vers. Wesen 21: 59-146.

Bailey R. L., 1980: Individual tree growth derived from diameter distribution models. For. Sci. 26: 626–632.

Bailey, R. L. u. Dell, T. R., 1973: Quantifying diameter distributions with the Weibull function. For. Sci. 19: 97-104.

Baker, J. B. u. Broadfoot, W. M., 1977: A practical field method for site evaluation for eight important Southern hardwoods. USDA For. Serv., Southern Forest Experiment Station, New Orleans, LA, Gen. Tech. Rep. SO-14.

Bauhus, J. u. Bartsch, N., 1996: Fine-root growth in beech (*Fagus sylvatica*) forest gaps. Can. J. For. Res. 26: 2153-2159.

Baur, F., 1877: Die Fichte in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form. Berlin, 103 S..

Baur, F. v., 1881: Über Durchforstungen und Durchforstungsversuche in Ganhofer: Das Forstliche Versuchswesen Bd. II, Augsburg.

Becker, G. u. Seeling, U., 1998: Holzqualität der Fichte. AFZ 53. Jg. Nr. 8: S. 434 - 435.

Bella, I. E., 1971: A New Competition Model for Individual Trees. For. Sci. 17 (3): 364-372.

Bergel, D., 1985: Douglasien-Ertragstafel für Nordwestdeutschland. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen. 72 S.

Bertalanffy, L. v., 1948: Quantitative laws in metabolism and growth. Quart. Rev. Biol. 32: 217-230.

Biber, P., 1996: Konstruktion eines einzelbaumorientierten Wachstumssimulators für Fichten-Buchen-Mischbestände im Solling. Diss. Forstw. Fak. d. Ludwig-Maximilians-Univ. München: 239 S.

Biederbick, K.-H., 1992: Die direkte Sonnenstrahlung als Standortfaktor. FA 63: 131-136.

Biging, G. S. u. Dobbertin, M., 1992: A comparison of Distance-Dependent Competition Measures for Height and Basal Area Growth of Individual Conifer Trees. For. Sci. 38 (3): 695-720.

Biging, G. S. u. Dobbertin, M., 1995: Evaluation of competition indices in Individual Tree Growth Models. For. Sci 41 (2): 360-337.

Biging, G. S. u. Gill, S. J., 1997: Stochastic models for conifer tree crown profiles. For. Sci. 43(1): 25-33.

Bolte, A. et al., 2002: Beziehungen zwischen Bestandes- und Wurzelstruktur von Rein- und Mischbeständen aus Buche (*Fagus sylvatica* L.) und Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.). Tagungsbericht der Sektionstagung Waldbau, 2002.

Bonnemann, A., 1939: Der gleichaltrige Mischbestand von Kiefer und Buche. Mitt. a. Forstwirt. u. Forstwiss. (5): 439-483.

Bonnemann, A., 1956: Eichen-Buchen-Mischbestände. AFJZ 127: 118-126.

Bossel, H., 1992: Das Modell FORMIX.

Bossel, H., 1994a: Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden. 402 S.

Bossel, H., 1994b: TREEDYN3 Forest Simulation Model. Mathematical model, program documentation and simulation results. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 35. Göttingen. 118 S.

Botkin, D. B., 1993: Forest Dynamics. An ecological model. Oxford University Press, New York. 309 S.

Botkin, D. R., Janak, J.F. u. Wallis, J.R., 1972: Some ecological consequences of a computer model of forest growth. The Journal of Ecology 60: 849-872.

Brink, C. u. Gadow, K. v., 1986. On the use of growth and decay functions for modelling stem profiles. EDV in Medizin und Biologie 17(1/2): 20-27.

Brokaw, N.V.L., 1982: The definition of treefall gap and its effect on measures of forest dynamics. Biotropica 14 (2): 158-160.

Brown, G. S., 1965: Point density in stems per acre. Forestry Research Notes No. 38, New Zealand, 1965. 11 S.

Bruchwald, A., Dudzinska, M. u. Wirowski, M., 1998: Model wzrostu dla lisciastych gatunkow drzew lesnych. Model wzrostu buka. Typescript in Forest Research Institute in Warsaw.

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, 1990: Bundeswaldinventur. Inventurbericht und Übersichtstabellen für das Bundesgebiet nach dem Gebietsstand vor dem 3.10.1990 einschließlich Berlin (West). Gitschel-Werbung, Hamburg.

Burger, H., 1939a: Kronenaufbau gleichaltriger Nadelholzbestände. Mitt. Schweiz. Anst. f. d. forstl. Vers. Wesen 21: 5-58.

Burger, H., 1939b: Baumkrone und Zuwachs in zwei hiebsreifen Fichtenbeständen. Mitt. Schweiz. Anst. f. d. forstl. Vers. Wesen 21: 147-176.

Burkhart, H. E., 1987: Data collection and modelling approaches for forest growth and yield prediction. In: Predicting Forest Growth and Yield - Current Issues, Future Prospects. Inst. of Forest Resources. Univ. of Washington. Contribution Nr. 58: 3-16.

Büttner, V. u. Leuschner, C., 1994: Spatial and temporal patterns of fine root abundance in a mixed oak beech forest. For. Ecol. Manag. 70: 11-21.

Cajander, A. K., 1909: Über Waldtypen. Acta For. Fenn. 1 (1):1-175. Helsingfors.

Cajander, A. K., 1926: The theory of forest types. Acta For. Fenn. 29 (3): 1-108.

Cao, Q.V., Burkhart, H.E. u. Lemin, Jr., 1982: Diameter distributions and yields of thinned loblolly pine plantations. VPI & SU, Sch. For. & Wildl. Resour. Publ FWS-1-82 62p.

Carbonnier, C., 1971: Yield of beech in Southern Sweden. Studia Forestalia Suecica Nr. 91. Royal College of Forestry, Stockholm, 89 S.

Carlyle, J. C., 1986: Nitrogen cycling in forested ecosystems. For. Abstracts 47: 307-336.

Carmean, W. H., 1973: Forest Soils Bibliography for the North Central Region. USDA For. Serv. Tech. Rep. NC-5.

Černý, M., Parez, J. u. Malik, Z., 1996: Rustové a taxační tabulky hlavních drevin. Ministerstva zemedelstiví.

Chen, S.-J. u. Hwang, C.-L., 1992: Fuzzy multiple attribute decision making - methods and applications. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 375. Springer Verlag.

Chikumbo, O., Mareels, I. M. Y. u. Turner, B. J., 1992: Integrating the Weibull into a dynamic model to predict future diameter distributions. In: Wood G.B. u. Turner, B.J., 1992: Integrating forest information over space and time. Proc. IUFRO Conf., Australian National Univ., Canberra: 94-102.

Chroust, L., 1968: Das Temperaturregime in verschieden durchforsteten Eichen-Stangenhölzern. AFJZ 139: 163-173.

Chung, D.-J., 1996: Konkurrenzverhältnisse und Struktur natürlicher *Pinus densiflora* - *Quercus variabilis* - Mischwälder in Korea. Diss. Fak. f. Forstw. u. Waldökologie, Universität Göttingen.

Clark, P. J. u. Evans, F. C., 1954: Distance to nearest neighbour as a measure of spatial relationships in populations. Ecology 35, 445-453.

Clutter, J. L., 1980: Development of taper functions from variable-top merchantable volume equations. For. Sci. 26(1): 117-120.

Clutter, J. L. u. Jones, E. P., 1980: Prediction of Growth after Thinning in Old-Field Slash Pine Plantations. USDA For. Serv. Res. Paper 217 S.

Clutter, J. L., Fortson, J.C., Pienaar, L.V., Brister, G.H. u. Bailey, R.L., 1983: Timber management - a quantitative approach. John Wiley: 333 p.

Colin, F. u. Houllier, F., 1991: Branchiness of Norway spruce in north-eastern France: modelling vertical trends in maximum nodal branch size. Annales des Sciences Forestieres 48: S. 679 - 693.

Colin, F. u. Houllier, F., 1992: Branchiness of Norway spruce in north-eastern France: predicting the main crown characteristics from usual tree measurements. Annales des Sciences Forestieres 49: S. 511 - 538.

Corral Rivas, J.J., Álvarez González, J. G., Ruíz González, A. D. u. Gadow, K. v., 2003: Compatible height and site index models for five pine species in El Salto, Durango (Mexico). Im Druck.

Courbaud, B., 1995: Modélisation de la croissance en forêt irrégulière, - perspectives pour les pessières irrégulières de montagne. Rev. For. Fr. XLVII No. sp.: 173.

Coutts, M. P., 1983: Root architektur and tree stability. Plant and Soil 56; 171-188.Cowley, J. M., 1975: Diffraction Physics. North Holland.

Craib, I.J., 1939: Thinning, Pruning and management studies on the main exotic conifers grown in South Africa. Govt. Printer, Pretoria.

Daniels, R. F., 1976: Simple Competition Indices and Their Correlation with Annual Loblolly Pine Tree Growth. Forest Science 22(4): 454-456.

Degenhardt, A., 1995: Analyse der Entwicklung von Bestandesstrukturen mit Hilfe des Modells der zufälligen Punktprozesse in der Ebene. Tagungsbericht, Dt. Verb. Forstl. Forschungsanstalten - Sektion Biometrie u. Informatik, 8.-10.9.93 in Freising: 93-105.

Demaerschalk, J. P., 1973: Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. Can. J. For. Res. 3 (1): 90-94.

Dengler, A., 1982: Waldbau auf ökologischer Grundlage. Bearbeitet von E. Röhrig und H. A. Gussone. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 275 S.

Dhôte, J. F., 1996: A model of even-aged beech stands productivity with process-based interpretations. Ann. Sc. For. 53, 1-20.

Dittmar, O., Knapp, E. u. Lembcke, G., 1986: DDR-Buchenertragstafel 1983. IFE-Berichte.

Döbbeler, H. u. Spellmann, H., 2002: Methodological approach to simulate and evaluate silvicultural treatments under climate change. FwCbl. 121, Supplement 1, 52-69.

Dralle, K., 1997: Locating trees by digital image processing of aerial photos. Dina Research Rapport No. 58: 116 p.

Drexhage, M., 1994: Die Wurzelentwicklung 40 jähriger Fichten (*Picea abies* [L.]) in der Langen Bramke (Harz). Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Band 111, Göttingen.

Eberhard, J., 1902: Tafeln zur Bonitierung und Ertragsbestimmung nach Mittelhöhen [Höhen-Ertragskurven] für Tanne, Fichte, Forche, Buche und Eiche. Selbstverl. d. Ver.

Eichhorn, F., 1904: Beziehungen zwischen Bestandeshöhe und Bestandesmasse. AFJZ 80: 45-49.

Eichhorn, J., 1992: Wurzeluntersuchungen an sturmgeworfenen Bäumen in Hessen. Forst und Holz 47(18); 555-559.

Ek, A. R. u. Monserud, R. A., 1974: Trials with program Forest: Growth and reproduction simulation for mixed species even- or uneven-aged forest stands. In: Fries, J. (ed.): Growth models for tree and stand simulation, Royal Collge of Forestry, Research Notes, Nr. 30: 56-73.

Ekö, P.M. u. Ågestam, E., 1994: A comparison of naturally regenerated and planted Scots pine (Pinus sylvestris L.) on fertile sites in southern Sweden. For u. Landsc. Res. 1:III-126.

Ellenberg, H., 1982: Ökosystemforschung. Ergebnisse des Sollingprojekts: 1966-1986. Verlag Ulmer. Stuttgart. 507 S.

Ellenberg, H., 1996: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer Sicht. 6. Auflage. Ulmer, Stuttgart.

Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W. u. Paulissen, D., 1991: Zeigerwerte von Pflanzen Mitteleuropas. Scripta Geobotanica XVIII. Goltze, Göttingen.

Evers, F. H. u. Moosmayer, H.-U., 1980: Zusammenhänge zwischen Standortseinheiten, Nährstoffverhältnissen des Bodens und Wachstum von Fichtenbeständen im regionalen Vergleich. FwCbl 99: 137-146.

Faber, R. J., 1987: The Japanese Larch in the Netherlands - a new growth prediction. Ned. Bosbouw-tijdskrift 59 (1/2): 13-27.

Fähser, L., 1998: Naturnahe Waldnutzung – das Beispiel Lübeck. Handbuch Kommunale Politik Raabe: S. 1-17.

Falinski, J. B., 1988: Succession, regeneration and fluctuation in the Bialowieza Forest. Vegetatio 77: 115-128.

FAO, 1997: State of the World's Forests. Rom.

FAO, 2001: Global Forest Resources Assessment – Main Report, Rom.

Fehrmann, L., Kuhr, M. u. Gadow, K. v., 2003: Zur Analyse der Grobwurzelsysteme großer Waldbäume an Fichte [*Picea abies* (L.) Karst.] und Buche [*Fagus sylvatica*]. Forstachiv 74 (3): 96-102.

Fiedler, H. J., Nebe, W. u. Hoffmann, F., 1973: Forstliche Pflanzenernährung und Düngung. Verlag G. Fischer, Jena.

Figueiredo-Filho, A., Borders, B.E. u. Hitch, K.L., 1996. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in Southern Brazil. Forest Ecology and Management 83: 39-46.

Flury, Ph., 1929: Über den Aufbau des Plenterwaldes. Mitteilungen der schweizerischen Centralanstalt für das Versuchswesen, Band 15: 305-357.

Fogel, R., 1983: Root turnover and productivity of coniferous forests. Plant and soil 71: 75-85.

Forslund, R. R., 1982: A geometrical tree volume model based on the location of center of gravity of the bole. Can. J. For. Res. 12: 215-221.

Forss, E., 1994: Das Wachstum der Baumart *Acacia mangium* in Südkalimantan, Indonesien. Magister Diss., Forstw. Fak., Univ. Göttingen, 87 S.

Forss, E., Gadow, K. v. u. Saborowski, J., 1996: Growth models for unthinned *Acacia mangium* plantations in South Kalimantan, Indonesia. J. of Trop. For. Sci. 8 (4): 449-462.

Franz F., Bachler J., Deckelmann B., Kennel E., Kennel R., Schmidt A. u. Wotschikowski U., 1973: Bayrische Waldinventur 1970/71 - Aufnahme und Auswertungsverfahren. Forstl. Forschungsanstalt München. Forschungsbericht Nr. 11.

Franz, F., 1972: Ertragskundliche Prognosemodelle. FwCbl 91: 65-80.

Frauendorfer, 1959: Fichtenertragstafel. In: Marschall, J., 1975: Hilfstafeln für die Forsteinrichtung. Österr. Forstverein, 2. Aufl., Wien.

Freist, H., 1962: Untersuchungen über den Lichtungszuwachs der Rotbuche und seine Ausnutzung im Forstbetrieb. Forstwiss. Forschungen Nr. 17. Paul Parey, Berlin.

Fritz, H. W., 1999: Feinwurzel- Verteilung, -Vitalität, -Produktion und -Umsatz von Fichten (*Picea abies*[L.] Karst.) auf unterschiedlich versauerten Standorten (ein Beitrag zur ökosystemorientierten Waldschadensforschung). Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Band 165, Göttingen.

Früh, T., 1992: C-Bilanz auf der Basis der Pipe-Modell-Theorie, Produktionsmodell. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme (Göttingen), Band 31: 355-367.

Fujimori, T. u. Kiyono, Y., 1986: Dynamics of crown structure and effects of crown control on tree growth in *Cryptomeria japonica*. In Fujimori, T. u. Whitehead (eds). Crown and canopy structure in relation to productivity. Published by the Forestry and Forest Products Institute, Ibaraki, Japan, pp. 243-262. ISBN 4-9900058-1-3.

Füldner, K. u. Gadow, K. v., 1994: How to Define a Thinning in a Mixed Deciduous Beech Forest. Proc. IUFRO Conference in Lousa, Portugal: Mixed stands - research plots, measurements and results, models, 1994: 31-42.

Füldner, K., 1995: Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern. Diss., Fak. f. Forstw. u. Waldökologie, Universität Göttingen. Cuvillier Verlag, 146 S.

Gadow, K. v., 1992: Ein Wachstums- und Ertragsmodell für die Fortschreibung von Bestandesparametern. In: Preuhsler, T., Röhle, H., Utschig, H. u. Bachmann, M. (Hrsg.): Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Franz; Lehrstuhl f. Waldwachstumskunde, Universität München: 75-83.

Gadow, K. v., 1996: Modelling growth in managed forests - realism and limits of lumping. *The Science of the Total Environment* 183: 167-177.

Gadow, K. v. u. Hui, G. Y., 1998: Modelling forest development. Kluwer Academic Publishers: 213 p.

Gadow, K. v. u. Heydecke, H., 2000: Wachstum und Durchforstung in einem Buchenmischbestand. Forst und Holz 56 (3): 86-88.

Gadow, K. v. u. Hui, G. Y., 1993: Stammzahlentwicklung und potentielle Bestandesdichte bei *Cunninghamia lanceolata*. Cbl. ges. Forstw. 110 (2): 41-48.

Gadow, K. v. u. Schmidt, M., 1998: Periodische Inventuren und Eingriffsinventuren. Forst und Holz, 22, 667-671.

Gadow, K. v. u. Stüber, V., 1994: Die Inventuren der Forsteinrichtung. Forst und Holz 49 (5): 129-131.

Gadow, K. v. u. Postoli, A., 1998: Waldwachstum: Modelle der Waldentwicklung. Skript aus dem Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde. Georg-August-Universität Göttingen, 201 S.

Gadow, K. v., 1984: The relationship between diameter and diameter increment in *Pinus patula*. Proceedings of the IUFRO Conference "Site and Productivity of Fast-growing Plantations", held at Pretoria 1984, Vol. 2: 741-751.

Gadow, K. v., 1987: Untersuchungen zur Konstruktion von Wuchsmodellen für schnellwüchsige Plantagenbaumarten. Forstl. Forschungsberichte, Universität München Nr. 77: 147 S.

Gadow, K. v., Heydecke, H. u. Riemer, Th., 1996: Zur Beschreibung der Schaftprofile stehender Waldbäume. Festschrift A. Akça, Inst. f. Forsteinrichtung u. Ertragskunde, Universität Göttingen: 31-44.

Gadow, K. v., Hui, G.Y. u. Albert, M., 1998: Das Winkelmaß - ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Waldbeständen. Cbl. ges. Forstw. 115: 1- 10.

Gaffrey, D., 1988: Forstamts- und bestandesindividuelles Sortimentierungsprogramm als Mittel zur Planung, Aushaltung und Simulation. Diplomarbeit, Fachbereich Forstwissenschaft, Universität Göttingen.

Gaffrey, D., 1996: Sortenorientiertes Bestandeswachstums-Simulationsmodell auf der Basis intraspezifischen, konkurrenzbedingungten Einzelbaumwachstums-insbesondere hinsichtlich des Durchmessers- am Beispiel der Douglasie. Diss. Forschungszentrum Waldökosysteme d. Uni. Göttingen: 413 p.

García, O., 1988: Experience with an advanced growth modelling methodology. In: Ek, A.R., Shifley, S.R. u. Burke, T.E. (eds): Forest growth modelling and prediction. USDA For. Serv. Gen. Techn. Rep. NC-120: 668-675.

Garcia, O., 1994: The state space approach in growth modelling. Can. J. For. Res. 24: 1894-1903.

Gates, D. M., 1980: Biophysical ecology. Springer Verlag, New York.

Gatzojannis, S., 1999: Yield tables for beech stands in the forest A. Brontou Serres Prefecture, N. Greece (in Griechisch). ΔΑΣΙΚΗ ΕΡΕΨΝΑ, 12: 91-104.

Gehrhardt, E., 1930: Ertragstafeln für reine und gleichaltrige Hochwaldbestände von Eiche, Buche, Tanne, Fichte, Kiefer, grüner Douglasie und Lärche. 2. Aufl. Julius Springer Verlag. 73 S.

Gehrke, J. T., Schlaghamersky, A. u. Sterzik, H. K., 1992: Tragfähigkeit und Befahrbarkeit von Waldböden. FuH 8: 205-207.

Gehrmann, J., 1984: Einfluss von Bodenversauerung und Kalkung auf die Entwicklung von Buchenverjüngungen im Wald. Bericht des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben 1.

Gerold, D., 1990: Modellierung des Wachstums von Waldbeständen auf der Basis der Durchmesserstruktur. Dissertation, B. TU Dresden.

Gerrard, D. J., 1969: Competition quotient - a new measure of the competition affecting individual forest trees. Mich. State Univ. Agr. Exp. Stn. Res. Bull. No. 20.

Giurgiu, V., Decei, I. u. Armasescu, S., 1972: Biometria arborilor ¸si arboretelor din România : Tabele dendrometrice. Ceres Verlag, 1154 S.

Golser, M. u. Hasenauer, H., 1997: Predicting juvenile tree height growth in uneven-aged mixed species stands in Austria. For. Ecol. And Mgmt 97: 133-146.

Göttsche, D., 1972: Verteilung von Feinwurzeln und Mykorrhizen im Bodenprofil eines Buchen- und Fichtenbestandes im Solling. Mitt. Bundesforschungsanstalt f. Forst- u. Holzwirtschaft 88: 102 S.

Goulding, C. J., 1972: Simulation technique for a stochastic model of growth of Douglas-fir. Ph. D. thesis. Univ. of Brit. Col. Vancouver. 185 S.

Grace, J. C. u. Pont, D., 1997: Modelling Branch Development in Radiata Pine. In: Amaro, A., Tomé, M. (ed.), Empirical and process-based models for forest tree and stand growth simulation, 21-27 September 1997, Oeiras, Portugal: S. 173-184.

Grammel, R., 1989: Forstbenutzung. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin: 193 S.

Gregar, T., 1992: Flora und Vegetation des Schlitzerlandes. Diss. TU Berlin. 462 S.

Gregoire, T. G., Valentine, H. T. u. Furnival, G. M., 1986: Estimation of bole volume by importance sampling. Can. J. For. Res. 16: 554-557.

Groll, M., 1996: Boden-, Bestandes- und Wurzelschäden beim Einsatz eines Harvestersystemes. Forst und Holz, 12: 409.

Gruber, F., 1992: Dynamik und Regeneration der Gehölze. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Band 86, Göttingen.

Grundner, F. u. Schwappach,A., 1942: Massentafeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände. 9. Auflage, Berlin.

Grundner, F., 1904: Untersuchungen im Buchenhochwalde über Wachstumsgang und Massenertrag. Berlin.

Gualdi, V., 1974: Ricerche auxometriche sulle faggete del Gargano. L'Italia Forestale e Montana. 29:85-116.

Gundersen, P., 1995: Impacts of nitrogen deposition - scientific background. UN ECE Convention on Long Range Transboundary Air Pollution. Annual Synoptic Report: 9-18.

Gurjanov, M.; Sánchez Orois, S. u. Schröder, J. 2000: Grundflächenmodelle für gleichaltrige Fichtenreinbestände - Eine vergleichende Analyse. Cbl. ges. Forstwes. 117. Jahrgang (2000). Heft 3/4, S.187-198.

Häckel, H., 1993: Meteorologie. Verlag Ulmer, Stuttgart. 402 S.

Hafley, W. L. u. Schreuder, H. T., 1977: Statistical distributions for fitting diameter and height data in even-aged stands. Canadian Journal of Forest Research 7: 481-487.

Hagglund, B., 1981: Evaluation of forest site productivity. Review article. For. Abstr. 42(11): 515-527.

Hahn, J. T. u. Leary, R. A., 1979: Potential diameter growth functions. In: A generalized forest growth projection system applied to the lake states region. USDA For. Serv., Gen. Tech. Rep. NC-49: 22-26.

Haith, D. A., Tubbs, L. J. u. Pickering, N. B., 1984: Simulation of pollution by erosion and soil nutrient loss. Pudoc. Centre for Agriculture Publishing and Documentation, Wageningen.

Hakes, W., 1994: On the predictive power of numerical and Braun-Blanquet classification: an example from beechwoods. Journal of Vegetation Science 5: 153-160.

Halaj, J. u. Petráš, R., 1998: Rastové tabuľky hlavných drevín. SAP – Slovac Academic Press, Bratislava.

Hamilton, G. J. u. Christie, J. M., 1971: Forest Management Tables (Metric). Her Majesty's stationary office.

Hamilton, G. J. u. Christie, J. M., 1971: Forest management tables (metrics). For. Comm. booklet n° 34. London: 32p.

Hänninen, H., 1990: Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. Acta Forestalia Fennica: 47 S.

Hapla, F., 1986: Beeinflussen unterschiedliche Durchforstungsmaßnahmen die Holzeigenschaften der Douglasie? Forstarchiv 57. Jg. Nr. 3: S. 99-104.

Hartig, R., 1868: Die Rentabilität der Fichtennutzholz- und Buchenbrennholzwirtschaft im Harze und im Wesergebirge. Stuttgart.

Hartig, Th., 1847: Vergleichende Untersuchungen über den Ertrag der Rotbuche. Verlag Albert Förstner. Berlin.

Hasenauer, H. u. Monserud, R. A., 1997: Biased predictions for tree height increment models developed from smoothed data. Ecol. Modelling 98: 13-22.

Hasenauer, H., 1994: Ein Einzelbaumwachstumssimulator für ungleichaltrige Fichten-, Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. Forstl. Schriftenreihe d. Universität f. Bodenkultur, Wien, Bd. 8: 152 S.

Hasenauer, H., Moser, M. u. Eckmüllner, O., 1994: Programmbeschreibung. Distanzabhängiger Wachstumssimulator für Mischbestände, MOSES 2.0. Inst. f. Waldwachstumsforschung, Universität f. Bodenkultur, Wien: 36 S.

Hasenauer, H., Moser, M. u. Eckmüllner, O., 1995: MOSES - a computer simulation program for modelling stand response. In: Pinto da Costa, M.E. and T. Preuhsler (eds.): Mixed stands, research plots, and results, models. Inst. Sup. De Agronomia, Univ. Tecnica de Lisboa, Portugal.

Hauhs, M., Rost-Siebert, K., Kastner-Maresch, A. u. Lange, H., 1993: A New Model Relating Forest Growth to Input and Output Fluxes of Energy and Matter of the Corresponding Ecosystem (TRAGIC). Final Report of Project EV4V-0032-D(B), Faculty of Forestry, Univ. of Göttingen.

Hegyi, F., 1974: A simulation model for managing jack-pine stands. 74-76p in Growth models for tree and stand simulation, Fries, J. (ed.). Royal Coll. of For., Stockholm.

Heinrich, D. u. Hergt, M., 1990: dtv-Atlas zur Ökologie. Deutscher Taschenbuchverlag, München. 283 S.

Henderson, G. S., Hammer, R. D. u. Grigal, D. F., 1990: Can measurable soil properties be integrated into a framework for characterizing forest productivity? In: Gessel, S. P., Lacate, D. S., Weetman, G. F. and Powers, R. F. (eds): Sustained productivity of forest soils. Proc. 7th North Am. Forest soils conf. Vancouver: 137-154.

Hendriks, C. M. A. u. Bianchi, F. J. J. A., 1995: Root density and root biomass in pure and mixed forests of Douglas fir and beech. Netherlands Journal of agricultural Science 43, 3: 321-331.

Hengst, E., 1959: Allgemeine Bemerkungen zur Weihmouthskiefer und ihrer Form. Archiv für Forstwesen 8: 781-811.

Hertel, D., 1999: Das Feinwurzelsystem von Rein- und Mischbeständen der Rotbuche: Struktur, Dynamik und interspezifische Konkurrenz. Diss. Bot. 317: 190 S.

Hertstein, U. u. Jäger, H. J., 1995: Wirkungen der sich ändernden Atmosphäre (CO2, O3, verstärkte UV-Strahlung) auf die Vegetation. In: Klimaänderungen und Naturschutz. Angewandte Landschaftsökologie, Heft 4. Bundesamt für Naturschutz, Bonn - Bad Godesberg.

Hessen, 1993: Richtlinien für die Bewirtschaftung des Staatswaldes (RIBES 93). Hrsg.: Ministerium für Landesentwicklung, Wohnen, Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz. 19 S.

Hessenmöller, D., 2001: Modelle zur Wachstums- und Durchforstungssimulation im Göttinger Kalkbuchenwald. Diss., Fak. f. Forstw. u. Waldökologie, Universität Göttingen. Logos Verlag, Berlin, 163 S.

Hessische Forsteinrichtungsanstalt, 1985: Hessische Anweisung zu Forsteinrichtungsarbeiten (HAFEA). Staatsanzeiger für das Land Hessen Nr. 32.

Holmes, M. J. u. Reed, D. D., 1991: Competition Indices for Mixed Species Northern Hardwoods. Forest Science 37(5): 1338-1349.

Hubbell, S. P., 2001: The unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography. Princeton University Press. Princeton u. Oxford: 375 S.

Hui, G. H. u. Hu Y. B., 2001: Measuring species spatial segregation in mixed forest. Forest Research. 14(1):23-27.

Hui, G. Y. u. Gadow, K. v., 1993a: Zur Entwicklung von Einheitshöhenkurven am Beispiel der Baumart *Cunninghamia lanceolata*. AFJZ 164: 218-220.

Hui, G. Y. u. Gadow, K. v., 1993c: Zur Modellierung der Bestandesgrundflächenentwicklung - dargestellt am Beispiel der Baumart *Cunninghamia lanceolata*. AFJZ 164: 144-149.

Hui, G. Y. u. Gadow, K. v., 1993b: Zur Modellierung des Oberhöhenwachstums bei *Cunninghamia lanceolata*. FA 64: 311-313.

Hui, G. Y. u. Gadow, K. v., 1996: Ein neuer Ansatz zur Modellierung von Durchmesserverteilungen. Cbl. ges. Forstw. 113 (¾): 101-113.

Hui, G. Y. u. Gadow, K. v., 1997: Entwicklung und Erprobung eines Einheitsschaftmodells für die Baumart *Cunninghamia lanceolata*. FwCbl. 116: 315-321.

Husch, B., Miller, C.I. u. Beers, T.W., 1982: Forest Mensuration. John Wiley & Sons.

Hussein, K. A., Albert, M. u. Gadow, K. v., 2000: The crown window- a simple device for measuring tree crowns. FwCbl. 119: 43-50.

Hussein, K. A., 2001: Parameter-parsimonious models for crown and stem profiles. Diss. Univ. of Göttingen: 118 p.

Hutchison, A. u. Matt, D. R., 1977: The distribution of solar radiation within a decidous forest. Ecol. Monogr. 47: 185-207.

Hyink, D. M., 1979: A generalized method for the projection of diameter distrubutions applied to uneven-aged forest stands. Unpublished Ph. Diss., Purdue University. 161 S.

Hyink, D. M., 1980: Diameter distributions approaches to growth and yield modelling. Proceedings of a Workshop on Forecasting stand dynamic. Lakehead University, Thunder Bay, Ontario, June 24-25.

Hyink, D. M., u. Moser, J. W., 1983: A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions. For. Sci. 29 (1): 85-95.

Itô, H., Sumida, A., Isagi, Y. u. Kamo, K., 1997: The crown shape of an evergreen Oak, *Quercus glauca*, in a hardwood community. J. For. Res. 2, 85-88.

Jack, W. H., 1967: Single tree sampling in even-aged plantations for survey and experimentation. IUFRO-Tagungsband, Sektion 25, München, S. 379-403.

Jäde, K., 1995: Ein Algorithmus zur quantitativen Beschreibung der Kronenstruktur von Nadelbäumen. Diplomarbeit. Inst. f. Numerische u. Angewandte Mathematik (unter Mitwirkung d. Inst. f. Forsteinrichtung u. Ertragskunde) Universität Göttingen: 91 S.

Jansen, J. J., Sevenster, J. u. Faber, P. J., 1996: Opbrengsttabellen voor belangrijke boomsoorten in Nederland. Hinkeloord Report Nr. 17, Landbouwuniversiteit, Wageningen: 202 S.

Jansen, M. u. Martin, G., 1995: Anwendung des Bestandessimulationsmodsells TREEDYN3 auf die Fichten-Versuchsfläche Solling F1. Berichte d. Forschungszentrums Waldökosysteme d. Universität Göttingen, Reihe B, Bd. 45: 1-79.

Jensen, M. u. Hofmann, G., 1997: Entwicklungszyklen des baltischen Buchenwaldes. AFZ/Der Wald 19: 1012-1018.

Jenssen, M. u. Hofmann, G., 2002: Pflanzenartenvielfalt, Naturnähe und ökologischer Waldumbau. AFZ/Der Wald 8/2002: 402-405.

Kahn, M., 1994: Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Dissertation, Forstwissenschaftliche Fakultät, Universität München.

Kahn, M., 1995: Quasikausale Modellierung des Standort-Leistungsbezuges als Voraussetzung zum Aufbau flexibler Mischbestands-Modelle. FwCbl. 114: 175-187.

Kändler, G., 1986: Ermittlung von Bestandesparametern als Eingangsgrößen für Interzeptionsmodelle mit Hilfe aerophotogrametrischer Verfahren. Mitteilungen der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg 127.

Kassier, H. W., 1993: Dynamics of Diameter and Height Distributions in Commercial Timber Plantations, PhD dissertation, Faculty of Forestry, Univ. of Stellenbosch, South Africa.

Keller, W., 1978: Einfacher ertragskundlicher Bonitätsschlüssel für Waldbestände in der Schweiz. Mitt. d. Eidgen. Anst. f. d. Versuchswesen, Bd. 54 (1): 1-98.

Kellomäki, S., 1986: A model for the relationship between branch number and biomass in *Pinus sylvestris* crowns and the effect of crown shape and stand density on branch and stem biomass. Scand. J. For. Res. 1: 455-472.

Kellomäki, S. u. Kurttio, O., 1991: A model for the structural development of a Scots pine crown based on modular growth. Forest Ecology and Management 43: 103-123.

Kellomäki, S. u. Strandman, H., 1995: A model for the structural growth of young Scots pine crowns based on light interception by shoots. Ecological Modelling 80: 237-250.

Kellomäki, S., Väisänen, H. u. Strandman, H., 1993: FINNFOR: A model for calculating the response of a boreal forest ecosystem to climate change. Univ. of Joensuu. Faculty of Forestry. Research Notes 6.

Kenk, G. u. Weise, U., 1998: Zu: Beobachtungen zur Bestandesstruktur undurchforsteter Fichtenbestände. AFZ/Der Wald 53: 937-939.

Kennel, R., 1972a: Die Buchendurchforstungsversuche in Bayern von 1870 bis 1970. Forschungsberichte der forstl. Forschungsanstalt München Nr. 7.

Kennel, R., 1972b: Die Bestimmung des Ertragsniveaus bei der Buche. Dt. Verb. Forstl. Forsch. Anst. 48-50, Neustadt a. d. W.

Kern, K. G., Moll, W. u. Braun, H. J., 1961: Wurzeluntersuchungen in Rein- und Mischbeständen des Hochschwarzwaldes (Vfl. Todtmoos 2/I-IV). AFJZ, 132: 241-260.

Kienast, F. u. Kuhn, N., 1989: Simulating forest succession along ecological gradients in Southern Central Europe. Vegetatio 79: 7-20.

Kimmins, J. P., 1987: Forest Ecology. Macmillan Publishing Company, New York.

Kimmins, J. P., 1990: Modeling the sustainability of forest production and yield for a changing and uncertain future. For. Chron. 66: 271-280.

Kiviste, A., Álvarez, J. G., Rojo, A., González, A. D., 2002: Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Comunicaciones I.N.I.A. Serie: Recursos Naturales. No. 4.

Klädtke, J., 1992: Konstruktion einer Z-Baum-Ertragstafel am Beispiel der Fichte. Dissertation, Forstliche Fakultät, Universität Freiburg.

Klier, G., 1969: Beitrag zu den Baumabstandsmethoden in der Forstwirtschaft. Arch. Forstwes., Berlin 18 Jg. Heft 12, S. 1257-1264.

Knoke, T. u. Plusczyk, N., 2001: On economic consequences of transformation of a spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) dominated stand from regular into irregular age structure. Forest Ecology and Management 151:163-179.

Kolström, T., 1992: Dynamics of uneven-aged stands of Norway Spruce - a Model Approach. Dissertation. Univ. Joensuu. Finnland.

Konitzer, A., 2000: Waldumbaumassnahmen und ihre betriebswirtschaftlichen Auswirkungen – eine GIS-gestützte Untersuchung am Beispiel des Niedersächsischen Harzes. Diss., Univ. Göttingen.

Koop, H., 1989: Forest Dynamics. Springer Verlag.

Korol, M. u. Gadow, K. v., 2002: Zur quantitativen Beschreibung von Fichtenkronen im Gebiet der ukrainischen Karpaten. Unveröff. Manuskript, Inst. F. Waldinventur u. Waldwachstum, Univ. Göttingen.

Korol, M. u. Gadow, K. v., 2003: Ein Einheitsschaftmodell für die Baumart Fichte. FwCbl. 122: 175-182.

Korotaev, A., 1994: Untersuchungen der Wurzelsysteme von forstlich wichtigen Baumarten im Nordwesten Rußlands. Dissertation, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Universität Göttingen.

Köstler, J. N., 1956: Waldbauliche Beobachtungen an Wurzelstöcken sturmgeworfener Waldbäume. FwCbl. 75: 65-91.

Köstler, J. N., Brückner, E., Bibelriether, H., 1968: Die Wurzeln der Waldbäume. Verlag Paul Parey, Hamburg.

Kotar, M., 1993: Bestimmung des Verteilungsmusters von Bäumen im Wald. Manuskript: 15 S.

Kouba, J., 1989: The theory of an estimate of the development of calamities and of management of the process of forest adjustment to normal forest. Lesnictvi 35 (10): 925-944.

Kozak, A., 1988: A variable exponent taper equation. Can. J. For. Res. 18: 1363-1368.

Kraft, G., 1884: Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover.

Krajicek, J. E., Brinkman, K. A. u. Gingrich, S. F., 1961: Crown competition. A measure of density. For. Sci. 7: 35-42.

Kramer, H., 1988: Waldwachstumlehre. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 374 S. ISBN 3-490-05616-7.

Kramer, H. u. Akça, A., 1995: Leitfaden zur Waldmesslehre. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt a.M. 266 S.

Kramer, H., 1990: Nutzungsplanung in der Forsteinrichtung. 2. Auflage. J. D. Sauerländer´s Verlag. Frankfurt a.M. 158 S.

Kramer, H., 1990: Zur Nutzungsplanung bei geänderter Waldstruktur. Forst und Holz, 45 (21): 621-623.

Kramer, K., 1996: Phenology and growth of European trees in relation to climate change. PhD Diss. Landbouw-Universität Wageningen: 157 S.

Kramer, P. J. u. Kozlowski, T. T., 1979: Physiology of woody plants. Academic press, New York: 811 p.

Kranigk, J. u. Gravenhorst, G., 1993: Ein dreidimensionales Modell für Fichtenkronen. AFJZ, 164: 146-149.

Kublin, E. u. Scharnagl, G., 1988: Verfahrens- und Programmbeschreibung zum BWI-Unterprogramm *BDAT*. Abschlußbericht, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, 7800 Freiburg i. Br.: 87 S.

Kuhr, M., 1999: Grobwurzelarchitektur in Abhängigkeit von Baumart, Alter, Standort und sozialer Stellung. Dissertation, Fak. f. Forstw. u. Waldökologie, Universität Göttingen.

Kurth, H., Gerold, D. u. Ulbricht, R., 1994: Forsteinrichtung. Deutscher Landschaftsverlag Berlin GMBH*:* 233-322.

Kurth, W., 1999: Die Simulation der Baumarchitektur mit Wachstumsgrammatiken. Habil., 327 pp. *ISBN* 3-932089-37-5.

Kurth, W., 1994a: Morphological models of plant growth: Possibilities and ecological relevance. In: Ecological Modelling, International Journal on Ecological Modelling and Systems Ecology. Volumes 75/76:299-308. Verlag Elsevier.

Kurth, W., 1994b: Growth Grammer Interpreter GROGRA 2.4: A software tool for the 3-dimensional interpretation of stochastic, sensitive growth grammars in the context of plant modelling. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe B, Bd. 38. 192 S.

Kurth, W., 1998: Some new formalisms for modelling the interactions between plant architecture, competition and carbon allocation. Bayreuther Forum Ökologie Bd. 52: 53-98.

Kutschera, L. u. Lichtenegger, E., 2002: Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. Leopold Stocker Verlag, Graz – Stuttgart.

Lähde, E., Laiho, O., Norokorpi, Y. u. Saska, T., 2002: Zuwachs von Fichte und Birke in gleich und ungleich strukturierten Beständen. Forst und Holz, 15/16, S. 483.

Larson, P. R., 1963: Stem form development of forest trees. Forest Science Monograph 5.

Lässig, R., 1991: Zum Wachstum von Fichtensolitären [*Picea abies* (L.) Karst.] in Südwestdeutschland. Dissertation, Univ. Freiburg.

Last, F. T., Mason, P. A., Wilson, J. u. Deacon, J. W., 1983: Fine roots and sheathing mycorrhizas: their formation, function and dynamics. Plant and Soil 71: 9-21.

Lee, Do-Hyung, 1998: Architektur der Wurzelsysteme von Fichten (*Picea abies* L.) auf unterschiedlich versauerten Standorten. Diss., Fak. f. Forstw. u. Waldökologie, Universität Göttingen.

Lee, W. K. u. Gadow, K. v., 1997: Iterative Bestimmung der Konkurrenzbäume in *Pinus densiflora* - Beständen. AFJZ, 186 (3/4): 41-44.

Lee, W. K., 1993: Wachstums- und Ertragsmodelle für Pinus densiflora in der Kangwon-Provinz, Korea. Diss., Forstwiss. Fachbereich, Univ. Göttingen,.Cuvillier Verlag, 178 S.

Lee, W. K., Seo, Jeong-Ho, Son, Young-Mo, Lee, Kyeong-Hak u. Gadow, K. v., 2003: Modelling stem profiles for Pinus densiflora in Korea. Forest Ecology and Management 172: 69-77.

Leemans, K., 1992: The biological component of the simulation model for boreal forest dynamics. In: A systems analysis of the global boreal forest: 428-445.

Leibundgut, H., 1978: Die Waldpflege. Paul Haupt, Bern und Stuttgart.

LeMay, V., Kozak, A., Muhairwe, K. u. Kozak, R. A., 1993: Factors affecting the performance of Kozak's (1988) variable-exponent taper function. In: Wood u. Wiant, 1993: 34-53.

Lembcke, G., Knapp, E. u. Dittmar, O., 1977: DDR-Kiefern-Ertragstafel 1975. Institut für Forstwissenschaft, Eberswalde, 30 S.

Lemm, R., 1991: Ein dynamisches Forstbetriebs-Simulationsmodell. Dissertation, ETH Zürich: 235 S.

Leslie, P. H., 1945: On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrika 33: 183-212.

Leuschner, C., 2002: Lebensraum Baumkrone - Schatzkiste der Biodiversität. Georgia Augusta, Wissenschaftsmagazin der Georg-August-Universität Göttingen; No. 1: 18-25.

Levins, R., 1966: The strategy of model building in population biology. American Scientist 54: 421-431.

Lewandowski, A. u. Gadow, K. v., 1997: Ein heuristischer Ansatz zur Reproduktion von Waldbeständen. AFJZ, 168.Jg., 9, 170-174.

Lewandowski, A. u. Pommerening, A., 1997: Zur Beschreibung der Waldstruktur - Erwartete und beobachtete Artendurchmischung. FwCbl. 116, 129-139.

Lindenmayer, A., 1975: Developmental algorithms for multicellular organisms: A survey of L-Systems. J. Theor. Biol. 54: 3-22.

Liu, C., Zhang, L., Davis, C. J., Solomon, D. S. u. Gove, J. H., 2002: A Finite Mixture Model for Characterizing the Diameter Distributions of Mixed-Species Forest Stands. Forest Science 48 (4): 653-661.

Liu, Q. u. Hytteborn, H., 1991: Gap structure, disturbance and regeneration in a primeval Picea abies forest. J. Veg. Sci. 2: 391-402.

Lorimer, C. G., 1983: Test of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands, For. Ecol. Manage. 6:343-360.

Lundegårdh, H., 1957: Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben. Fischer Verlag, Jena, 598 S.

Lüpke, B. v., 1992: Waldbau ohne Kahlschlag – Möglichkeiten und Risiken. Forstarchiv 63 (1): 10-15.

Luxmore, R. J., Oren, R., Sheriff, D. W. u. Thomas, R. B., 1995: Source - sink - storage relationships of conifers. In: Smith, W.K. and Hinckley, T.M. (eds): Resource physiology of conifers. Academic Press: 179-216.

Madrigal, A., Puertas, F. u. Martinez Millan, F. J., 1992: Tablas de producción para *Fagus sylvatica* en Navarra. Gobierno de Navarra. Dpto. de Agric. Ganadería y Montes. Serie Agraria n° 3, Pamplona: 133 S.

Madrigal, A., Puertas, F. u. Martinez Millan, J., 1992: Tablas de producción para Fagus sylvatica L. en Navarra. Gobierno de Navarra, Dep. de Agricultura, Ganaderia y Montes.

Maguire, D. A., Moeur, M. u. Bennett, W. S., 1994: Models for describing basal diameter and vertical distribution of primary branches in young Douglas-Fir. Forest Ecology and Management 63: S. 23 - 55.

Maguire, D. A. u. Hann, D. W., 1989: The relationship between cross crown dimensions and sapwood area at crown base in Douglas-fir. Can. J. For. Res. 19(5), 557-565.

Maier, C. A. u. Teskey, R. O., 1992: Internal and external control of net photosynthesis and stomatal conductance of mature eastern white pine (*Pinus strobus*). Can. J. For. Res. 22: 1387-1394.

Maltamo, M., Puumalainen, J. u. Päivinen, R., 1995: Comparison of beta and Weibull functions for modelling the basal area diameter distribution in stands of *Pinus silvestris* and *Picea abies*. Scand. J. For. Res. 10: 284-295.

Marques, P., 1991: Evaluating site quality of even-aged stands in northern Portugal using direct and indirect methods. For. Ecol. & Management 41: 193-204.

Martin, G. L. u. A. R. Ek, 1984: A Comparison of Competition Measures and Growth Models for Predicting Plantation Red Pine Diameter and Height Growth. For. Sci. 30 (3): 731-743.

Matèrn, B., 1986: Spatial Variation. 2nd edition. Lecture Notes in Statistics. Springer-Verlag Berlin, 151 S.

Matsuda, M. u. Baumgartner, A., 1975: Ökosystemare Simulation des Nutzeffektes der Sonnenenergie für Wälder. FwCbl 94: 89-104.

Matsue, K., Iwagami, S., Yamamoto, T. u. Shibayama, Z., 1999: Modelling crown form of Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) based on branch measurement. J. For. Plann 5: 13-18.

Matsumura, N., 1988: Entwicklung und Anwendungsmöglichkeiten eines einzelbaumorientierten Simulationsmodells für Douglasie. Diss. Georg-August-Universität Göttingen.

Matthies, D., Weixler, H. u. Hess, U., 1995: Befahrungsbedingte Strukturveränderungen von Waldböden. AFZ/Der Wald (22): 1218-1221.

Matyssek, R., 2003: Kosten und Nutzen von Raumbesetzung und –ausbeute. AFZ/Der Wald 17: 862-863.

Max, T.A. u. Burkhart, H.E., 1976: Segmented polynomial regression applied to taper equations. For. Sci., 22(33): 283-289.

Mayer, H., 1984: Waldbau auf sozio-ökologischer Grundlage. 3. Auflage, Fischer-Verlag Stuttgart.

Mehldahl, R. S. u. Beltz, R. C., 1990: Summary of modelling efforts for SET: Southeastern TWIGS, School of Forestry. Auburn University Alabama.

Mendlik, G., 1983: Beech Yield Table (in Ungarisch). Erdeszeti-Kutatasok, 75:157-162.

Meng, X. Y., 1991: The significance of taper equations and stand diameter structures in developing merchantable volume tables. Journal of Beijing Forestry University, 13(2):14-20.

Meusel, H., Jäger, E. u. Weinert, E., 1965: Vergleichende Chorologie der zentraleuropäischen Flora.Karten/Text. Jena.

Michailoff, I., 1943: Zahlenmäßiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. Forstw. Cbl. u. Thar. Jahrb. 6: 273-279.

Mitscherlich, G., 1939a: Sortenertragstafel für Kiefer, Buche und Eiche. Mitt. Forstwirtsch. u. Forstwiss. 10: 1-86.

Mitscherlich, G., 1939b: Sortenertragstafel für Fichte. Mitt. Forstwirtsch. u. Forstwiss. 10: 87-101.

Mitscherlich, G., 1942: Der Einfluß des Seewindes auf das Wachstum von Kiefer, Fichte, Buche, Birke, Erle. Thar. Forstl. Jahrb. 93: 346-373.

Mitscherlich, G., 1961: Untersuchungen in Plenterwäldern des Schwarzwaldes. AFJZ 132: 61-73 + 85-95.

Mitscherlich, G., 1970: Wald, Wachstum und Umwelt. 1. Band: Form und Wachstum von Baum und Bestand. J.D. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt a. M. 144 S.

Mitscherlich, G., 1971: Wald, Wachstum und Umwelt. 2. Bd: Waldklima und Wasserhaushalt. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M. 365 S.

Mitscherlich, G., 1975: Wald, Wachstum und Umwelt. 3. Bd: Boden, Luft und Produktion. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M. 352 S.

Mitscherlich, G., 1978: Wald, Wachstum und Umwelt. 1. Band: Form und Wachstum von Baum und Bestand. 2., überarbeitete Auflage. J.D. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt a. M. 144 S.

Mitscherlich, G., Kern, K. G. u. Künstle, E., 1963: Untersuchungen über den Kohlensäuregehalt in Plentergehalt und Fichtenreinbestand. AFJZ 134: 281-290.

Moeur, M., 1993: Crown width and foliage weight of northern Rocky mountain conifers. USDA For. Serv. Res. Pap. INT.-283.

Mohr, H. u. Schopfer, P., 1992: Lehrbuch der Pflanzenphysiologie. Springer-Verlag, Berlin. 408 S.

Mohren, G. M. J., Van Gerwen, C. P. u. Spitters, C. J. T., 1984: Simulation of primary production in even-aged stands of Douglas-fir. For. Ecology Manage. 9, 27-49.

Möhring, B., 1986: Dynamische Betriebsklassensimulation. Berichte d. Forschungszentrums Waldökosysteme, Univ. Göttingen, Bd 20.

Møller, C. M., 1933: Bonitetsvise Tilvaekstovesigter for BØg, Eg og RØdgran in Danmark. Sammendrag fra Dansk Skovf. Tidsskr. 18.

Monsi, M. u. Saeki, T., 1953: The light factor in plant association and its importance in dry matter production. Japan. J. Bot. 14: 22-52.

Mooney, H. A., 1986: Photosynthesis. In: Plant Ecology. Edited by M. J. Crawley. Blachwell Scientific Publications, Oxford: 345-373.

Moosmayer, H.-U. u. Schöpfer, W., 1972: Beziehungen zwischen Standortsfaktoren und Wuchsleistung der Fichte. AFJZ 143 (10): 203-215.

Moosmayer, U., 1957: Zur ertragskundlichen Auswertung der Standortsgliederung im Ostteil der schwäbischen Alb. Mitt. d. Vereins f. forstl. Standortskunde, Forstpflanzenzüchtung 7: 1-41.

Moser, J. W., 1974: A system of equations for the components of forest growth. In: J. Fries (Hrsg): Growth models for tree and stand simulation; Royal College of Forestry. Research Notes Nr. 30: 56-76.

Moser, M., 1964: Die Mykorrhizafrage bei der Anzucht von Forstpflanzen für das Hochgebirge. In Schmidt-Vogt, H., 1964: Forstsamengewinnung und Forstpflanzenzucht für das Hochgebirge: 225-231.

Moser, W. G., 1793: Einige Actenstücke über die Forst-Einrichtung. In: Moser's Forst-Archiv, Ulm: 147-243.

Muhairwe, C. K., 1999: Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus grandis* for the north coast in New South Wales, Australia. Forest Ecology and Management 113: 251-269.

Murach, D., 1991: Feinwurzelumsätze auf bodensauren Fichtenstandorten. Forstarchiv 62: 12-17.

Murach, D., 1984: Die Reaktion der Feinwurzeln von Fichten auf zunehmende Bodenversauerung. Diss., Forstwissen. Fachbereich, Universität Göttingen.

Murray, D. M. u. Gadow, K. v., 1993: A flexible yield model for regional timber forecasting. Southern Journal of Applied Forestry 17 (2): 112-115.

Murray, D. M. u. Gadow, K. v., 1991: Relationships between the diameter distributions before and after thinning. For. Sci. 37 (2): 552-559.

Nagashima, I. u. Kawata, N., 1994: A stem taper model including butt swell. J. Jpn. For. Soc. 76(4): 291-297.

Nagel, J. u. Biging, G. S., 1995: Schätzung der Parameter der Weibull-Funktion zur Generierung von Durchmesserverteilungen. AFJZ 166 (9/10): 185-189.

Nagel, J., 1994: Ein Einzelbaumwachstumsmodell für Roteichenbestände. Forst und Holz. 49. Jahrgang. Nr. 3, 69-75.

Nagel, J., 1998: Möglichkeiten der Einschätzung von Artendiversität und Struktur im Rahmen von Betriebsinventuren. Vortrag am 14. 7. 1998, Fak. f. Forstw. u. Waldökologie, Univ. Göttingen.

Nagel, J., 1999: Konzeptionelle Überlegungen zum schrittweisen Aufbau eines waldwachstumskundlichen Simulationssystems für Nordwestdeutschland. Schriften aus d. Forstl. Fak. D. Univ. Göttingen u. d. Nieders. Forstl. Vers. Anst.; Bd 128.

Nagel, J., Albert, M. u. Schmidt, M., 2002: Das waldbauliche Prognose- und Entscheidungsmodell BWINPro 6.1. Forst und Holz. 57 (15/16):486-493.

Nagel, P., 1976: Die Darstellung der Diversität von Biozönosen. Schriftenreihe Vegetationskunde 10: 381-391. Bonn-Bad Godesberg.

Namikawa, K. u. Kawai, Y., 1998: Stand structure and establishment process of an old-growth stand in the mixed deciduous broadleaf/conifer forest of Mt. Moiwa forest reserve, Central Hokkaido, Northern Japan. J. For. Res. Japan 3: 205-211.

Nepal, S. K. u. Somers, G. L., 1992: A generalized approach to stand table projection. For. Sci. 38: 120 – 133.

Newberry, J. D. u. Burkhart, H. E., 1986: Variable-form stem profile models for loblolly pine. Can. J. For. Res. 16: 109-114.

Newnham, R. M., 1992: Variable-form taper functions for four Alberta tree species. Can. J. For. Res. 22: 210-223.

Niedersachsen, 1991: Langfristige ökologische Waldentwicklung in den Landesforsten – Programm der Landesregierung Niedersachsen. Niedersächsisches Ministerium f. Ernährung, Landw. U. Forsten: 49 S.

Nielsen, C. C. N., 1990: Einflüsse von Pflanzenabstand und Stammzahlhaltung auf Wurzelform, Wurzelbiomasse, Verankerung sowie auf die Biomasseverteilung im Hinblick auf die Sturmfestigkeit der Fichte. Schriften aus der Forstl. Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstl. Versuchsanstalt, Band 100. J. D. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt a. M.

Nielsen, C. C. N., 1995: Report of project "Development of roots and root/shoot-rations". Air3-CT93-1269. unveröffentlicht.

Nordrhein-Westfalen, 1991: Waldwirtschaft 2000 - Gesamtkonzept für eine ökologische Waldbewirtschaftung des Staatswaldes in Nordrhein-Westfalen. Hrsg.: Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft, Landesforstverwaltung. 35 S.

Oohata, S-I., 1986: Some quantitative analysis of tree form. Further extensions to the pipe model theory. In Fujimori, T. u. Whitehead (eds). Crown and canopy structure in relation to productivity. Published by the Forestry and Forest Products Institute, Ibaraki, Japan, pp. 243-262. ISBN 4-9900058-1-3.

Ortloff, W. u. Schlaepfer, R., 1997: Stickstoff und Waldschäden - eine Literaturübersicht. AFJZ 167 (9-10): 184-201.

Otto, H.-J., 1989: Langfristige ökologische Waldbauplanung für die Niedersächsischen Landesforsten. Aus dem Walde, Heft 42.

Otto, H.-J., 1991: Langfristige ökologische Waldbauplanung für die Niedersächsischen Landesforsten. Aus dem Walde, Heft 43.

Otto, H.-J., 1994: Waldökologie. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.

Otto, H.-J., 1995: Zielorientierter Waldbau und Schutz sukzessionaler Prozesse – eine Diskussion. Forst u. Holz 50: 203-209.

Otto, H.-J., 2002: Antriebskräfte natürlicher Buchenwalddynamik in Europa. Forst und Holz 57 (21): 649-653.

Ottorini, J. M., 1991: Growth and development of individual Douglas Fir stands for applications to simulation in silviculture. Annales des sciences Forestieres 48.

Pardé, J. u. Bouchon, J., 1990: Dendrométrie. Ecole Nationale du Genie Rural des Eaux et des Forêts, Nancy.

Pardé, J., 1961: Dendrométrie. Editions de l'École nationale des Eaux et des Forêts, Nancy.
Paterson, S. S., 1962: Introduction to Phytochorology of Norden. Medd. Stat. Skogsforskininginstitut 50: 1-145.
Paulsen, J. C., 1795: Praktische Anweisung zum Forstwesen. Detmold.
Pearson, S. M., Turner, M. G., Gardner, R. H. u. O'Neill, R. V., 1996: An organism-based perspective of habitat fragmentation. In: Szaro u. Johnston, 1996: 41-57.
Penning de Vries, F. W. T. u. van Laar, H. H., 1982: Simulation of plant growth and crop production. Pudoc Centre for Agriculture Publishing and Documentation, Wageningen.
Penttinen, A., Stoyan, D. u. Henttonen, H. M., 1994: Marked Point Processes in forest statistics. For. Sci. 38 (4): 806-824.
Perpeet, M., 1999: Weniger wäre mehr – waldbauliche Illusion oder Chance? Forst u. Holz 54 (3): 71-74.
Petterson, N., 1954: Die Massenproduktion des Nadelwaldes. Medd. Stat. Skogsforskninginst. 45.
Philip, M. S., 1994: Measuring Trees and Forests. Cab International.
Pielou, E. C., 1977: Mathematical ecology. John Wiley.
Pienaar, L. V., Harrison, W. M. u. Rheney, J. W., 1990: PMRC Yield Prediction System for Slash Pine Plantations in the Atlantic Coast Flatwoods. Plantation Management Research Cooperative. School of Forest Resources. University of Georgia.
Polomski, J. u. Kuhn, N., 2001: Wurzelhabitus und Standfestigkeit der Waldbäume. Forstwissenschaftliches Centralblatt 120; 303-317.
Pommerening, A., 1997: Eine Analyse neuer Ansätze zur Bestandesinventur in strukturreichen Wäldern. Diss., Fak. f. Forstw. u. Waldökologie, Göttingen. Cuvillier Verlag Göttingen. 187 S.
Pommerening, A., 2002: Approaches to quantifying forest structures. Forestry. 75(3): 305-324.
Pressler, M. R., 1865: Das Gesetz der Stammbildung und dessen forstwirtschaftliche Bedeutung für den Waldbau höchsten Reinertrags. Arnold Verlag, Leipzig: 153 S.
Pretzsch, H., 1991a: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Habilitationsschrift. Universität München.
Pretzsch, H., 1991b: Konzeption einer modellorientierten Mischbestandsforschung. Vortrag anläßlich der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des Dt. Verb. Forstl. Forschungsanstalten in Treis/Mosel am 13. Mai 1991.
Pretzsch, H., 1992: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Schriftenreihe der Forstwissenschatlichen Fakultät, Universität München, No. 115: 332.
Pretzsch, H., 1993: Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen - Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN. Schriften aus der Forstl. Fak. d. Univ. Göttingen u. d. Nieders. Forstl. Vers. Anst., Band 114, J.D. Sauerländer's Verlag.
Pretzsch, H., 1994: Waldwachstumsforschung in strukturreichen Rein- und Mischbeständen - Untersuchungsansatz, Arbeitsschwerpunkte, Kooperationsbedarf. Tagungsbericht der Sektion Ertragskunde des Dt. Verb. Forstl. Forschungsanstalten: 6-26. Habilitationsschrift.
Pretzsch, H., 1995: Perspektiven einer modellorientierten Waldwachstumsforschung. FwCbl 114: 188-209.
Pretzsch, H., 2001: Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag Berlin: 341 S.
Pretzsch, H. u. Bossel, H., 1988: Rahmenbedingungen für die Konstruktion forstlicher Wachstumsmodelle und Simulationsprogramme. AFZ (22): 615 - 617.
Pretzsch, H., u. Kahn, M., 1998: Forschungsvorhaben „ Konzeption und Konstruktion von Wuchs- und Prognosemodellen für Mischbestände in Bayern": Abschlußbericht Projekt W28 Teil 2. Konzeption und Konstruktion des Wuchsmodells SILVA 2.2 – Methodische Grundlagen. Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München, Freising, 279 S.
Prodan, M., 1965: Holzmeßlehre. J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a. M., 644 S.
Prusinkiewicz, P. u. Lindenmayer, A., 1990: The Algorithmic Beauty of Plants. Verlag Springer, New York. 227 S.
Puhe, J., 1994: Die Wurzelentwicklung der Fichte (Picea abies [L.] Karst.) bei unterschiedlichen chemischen Bodenbedingungen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Band 108, Göttingen.
Pukkala, T. u. Kolström, T., 1988: Simulation of the Development of Norway Spruce Stands using a Transition Matrix. For. Ecol. and Mgmt 25: 255-267.
Puumalainen, J., 1996: Die Beta-Funktion und ihre analytische Parameterbestimmung für die Darstellung von Durchmesserverteilungen. Arbeitspapier 15-96, Inst. f. Forsteinrichtung, Univ. Göttingen: 12 S.
Rademacher, P., 2002: Ermittlung der Ernährungssituation, der Biomasseproduktion und der Nährelementakkumulation mit Hilfe von Inventurverfahren sowie Quantifizierung der

Entzugsgrößen auf Umtriebsebene in forstlich genutzten Beständen. Habilitationsschrift, Univ. Göttingen.

Ramirez-Maldonado, H., Bailey, R. L. u. Borders, B. B., 1988: Some implications of the algebraic difference form approach for developing growth models. In: Ek, A.R., Shifley, S.R. u. Burke, T.E. (eds): Forest growth modelling and prediction. USDA For. Serv. Gen. Techn. Rep. NC-120: 731-738.

Rapp, C., 1991: Untersuchungen zum Einfluss von Kalkung und Ammoniumsulfat-Düngung auf Feinwurzeln und Ektomykorrhizen eines Buchenaltbestandes im Solling. Ber. Forschungsz. Waldökosysteme Göttingen A 72: 293 S.

Raunkiaer, C., 1907: Planterigets Livsformer og deres Betydning for Geografien. Kjöbenhavn, Kristiana. (Engl. Übersetzung von Gilbert-Carter, H., 1937: Plant life forms. Clarendon press, Oxford.)

Rautiainen, O., 1999: Growth Dynamics and Management of *Shorea robusta* Forests in Southern Nepal. Dissertation, Univ. Joensuu.

Raven, P. H., Evert, R. F. u. Eichhorn, S. E., 1987: Biology of plants. Worth Publishers Inc.

Reed, D. D. u. Green, E. J., 1984: Compatible stem taper and volume ratio equations. For. Sci. 30 (4): 977-990.

Reinecke, L. H., 1933: Perfecting a Stand Density Index for Even-Aged Forests. J. Agric. Res. 46: 627-638.

Remmert, H., 1991: Das Mosaik-Zyklus-Konzept und seine Bedeutung für den Naturschutz – eine Übersicht. Tagungsbericht „Das Mosaik-Zyklus-Konzept der Ökosysteme und seine Bedeutung für den Naturschutz“, 6.-9. Sept. 1989; Bayer. Akademie f. Naturschutz u. Landschaftspflege: 5-15.

Rennie, P. J., 1963: Methods of assessing site capability. Commonw. For. Rev. 42: 306-317.

Rennols, K u. Smith, W. R., 1993: Zone of Influence Models for Inter Tree Forest Competition. In: Rennols, K. (ed) 1993: Stochastic Spatial Models in Forestry. Proc of a IUFRO S4.11 Conf. held in Thessaloniki, Greece; published by The University of Greenwich: 27-36.

Richardson, C. W., 1981: Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. Water Resources Research 17: 182-190.

Riemer, T., Gadow, K. v. u. Sloboda, B., 1995: Ein Modell zur Beschreibung von Baumschäften. AFJZ, 166(7): 144-147.

Rièra, B., 1982: Observations sur les chablis, Piste de St. Elie, Guyane. Bulletin de liaison de groupe de travail sur l'écosystème forestier guyanais, ORSTOM, Cayenne, 6:165-183.

Rodriguez Soalleiro, R. J., Alvarez Gonzalez, J. G. u. Vega Alonso, G., 1994: Pineiro do Pais - Modelo dinamico de crecemento de masas regulares de *Pinus pinaster* Aiton en Galicia. Xunta de Galicia:40 S.

Röhe, P., 1985: Untersuchungen über das Wachstum der Buche in Baden-Württemberg. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg 61.

Rojo, A. u. Montero, G., 1996: El Pino Silvestre en la Sierra de Guadarrama. Ministerio de Agriculture, Pesca y Alimentacion, Madrid: 293 S.

Römisch, K., 1983: Ein mathematisches Modell zur Simulation von Wachstum und Durchforstung gleichaltriger Reinbestände. Dissertation, Universität Tharandt.

Römisch, K., 1995: Durchmesserwachstum und ebene Bestandesstruktur am Beispiel der Kiefernversuchsfläche Markersbach. DVFFA-Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, 8. Tagung Grillenburg, S. 84-103.

Roschak, C., 1999: Schnellwuchsuntersuchung Lensahn - Eine Untersuchung zur Bedeutung schnellwachsender Baumarten im naturnahen Waldbau. Projektbericht für Gesellschaft zur Förderung schnellwachsender Baumarten in Norddeutschland e.V.: 37 S.

Rothe, A., 1997: Einfluss des Baumartenanteils auf Durchwurzelung, Wasserhaushalt, Stoffhaushalt und Zuwachsleitung eines Fichten-Buchen-Mischbestandes am Standort Höglwald. Forstl. Forschungsber. München 163: 213 S.

Rubner, K., 1960: Die pflanzengeographischen Grundlagen des Waldbaus. Radebeul.

Rudra, A. B., 1968: A stochastic Model for the Prediction of Diameter Distributions of Even-aged Forest Stands. OPSEARCH. Journal of the operational Society of India. 5 (2): 59-73.

Rysavy, T. u. Roloff, A., 1994: Ursachen der Vereschung in Mischbeständen und Vorschläge zu ihrer Vermeidung. Forst u. Holz 49: 392-395.

Saborowski, J., 1982: Entwicklung biometrischer Modelle zur Sortimentenprognose. Dissertation, Universität, Göttingen.

Saeki, T., 1963: Light relations in plant communities. In: Evans, L.T. (ed): Environmental control of plant growth. Academic Press, Nwe York und London.

Sánchez Orois, S., Gurjanov, M. u. Schröder, J., 2001: Analyse des Grundflächenzuwachses gleichaltriger Fichtenreinbestände. AFJZ, 172, 3, 51-59.

Sánchez Orois, S., Kotzé, H. u. Corral Rivas, J. J., 2003: Ein kompatibles Modell für die Fortschreibung von Durchmesserverteilungen. Vortrag anlässlich der Jahrestagung der Sektion Ertragskunde des Deutschen Verbandes Forstlicher Forschungsanstalten in Torgau am 2. – 4. Juni 2003.

Sánchez-Orois, S. u. Vilčko, F., 2002: Generierung, Bewertung und Optimierung von Managementoptionen für die Vornutzung von Fichtenbeständen. Vortragsmanuskript Ertragskundetagung im Mai 2002.

Sauter, U. H. u. Fahrbach, M., 1993: Ästigkeitsverhältnisse und Schnittholzqualität in einem weitständig begründeten Fichtenbestand. AFZ 48. Jg. Nr. 17: S. 875 - 878.

Scheffer, F. u. Schachtschabel, P., 1976: Lehrbuch der Bodenkunde. Fischer Verlag, Stuttgart.

Schmid, I. u. Kazda, M., 2001: Vertical distribution and radial growth of coarse roots in oure and mixed stands of Fagus sylvatica and Picea abies. Can. J. For. Res. 31: 539-548.

Schmidt, M. G. u. Carmean, W. H., 1988: Jack pine site quality in relation to soil and topography in North Central Ontario. Can. J. For. Res. 18: 297-305.

Schmidt, M., 2001: Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten. Diss., Fak. f. Forstwiss. u. Waldökologie, Univ. Göttingen. 302 S.

Schmidt, M., Schütz, J.-P. u. Gadow, K. v., 1997: Strukturanalyse in vier Plenterüberführungsbeständen. Schweiz. Zeitschr. f. Forstw. 148 (5): 335-352.

Schmidt, W., 1991: Die Bodenvegetation im Wald und das Mosaik-Zyklus-Konzept. Tagungsbericht „Das Mosaik-Zyklus-Konzept der Ökosysteme und seine Bedeutung für den Naturschutz“, 6.-9. Sept. 1989; Bayer. Akademie f. Naturschutz u. Landschaftspflege: 16-29.

Schmidt-Vogt, 1986: Die Fichte. Paul Parey, Berlin.

Schober, R., 1952: Ausbauchungsreihen. In: Grundner, F., Schwappach, A., 1952: Massentafeln zur Bestimmung des Holzinhaltes stehender Waldbäume und Waldbestände. 10. völlig neu bearbeitete Auflage; Hrsg. R. Schober. Paul Parey, Berlin und Hamburg.

Schober, R., 1953: Ertragstafeln und Forsteinrichtung. Forstwissenschaftliches Centralblatt 72: 1-13.

Schober, R., 1972: Die Rotbuche 1971. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 333 S.

Schober, R., 1987: Ertragstafeln wichtiger Baumarten. J. D. Sauerländer´s Verlag. Frankfurt a. M., 154 S.

Schober, R., 1991: Eclaircies par le Haut et Arbres D´avenir. Rev. For. Fr. XLIII: 385-402.

Schober, R., 1994: Darstellung von Durchforstungsgraden. Unveröffentl. Vorlesungsmanuskript. Institut für Forsteinrichtung und Ertragskunde, Universität Göttingen.

Schober, R., 1995: Ertragstafeln wichtiger Baumarten. J. D. Sauerländer´s Verlag. Frankfurt a. M.

Schönau, A. P. G. u. Aldworth, W. J. K., 1991: Site evaluation in black wattle with special reference to soil factors. S. Afr. For. J. 156: 35-43.

Schönau, A. P. G., 1988: A re-appraisal of a site evaluation study in Black Wattle with special reference to soil factors. In: Research Contributions to Plantation Forestry (ed. K. v. Gadow), Faculty of Forestry, Stellenbosch: 83-102.

Schönhar, S., 1993: Die Waldbodenvegetation als Standortsweiser. AFJZ 164: 173-180.

Schröder, J. u. Gadow, K. v., 1999: Testing a new competition index for maritime pine in North-Western Spain. Can. J. For. Res. 29: 280-283.

Schröder, J., 1998: Beschreibung von Bestandesstrukturen im Knysna-Wald, Südafrika. Diplomarbeit, Fak. f. Forstwissen. u. Waldökologie, Univ. Göttingen.

Schröder, J., Oliver-Villanueva, J. V., Rojas-Briales, E. u. Gadow, K. v., 1995: Zum Höhenwachstum von *Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRA. in Katalonien. FA 66: 214-217.

Schröder, J., Rodríguez, R., u. Vega Alonso, G., 2002: An age-independent basal area increment model for Maritime Pine trees in North-Western Spain. Forest Ecology & Management 157: 55-64.

Schübeler, D., 1997: Untersuchungen zur standortabhängigen Wachstumsmodellierung bei der Fichte. Diss. Fak. f. Forstwiss. u. Waldökologie d. Univ. Göttingen.

Schübeler, D., Nagel, J., Pommerening, A. u. Gadow K. v., 1995: Modellierung des standortbezogenen Wachstums der Fichte. Unveröffentlichtes Manuskript, Institut f. Forsteinrichtung u. Ertragskunde, Univ. Göttingen: 68 S.

Schubert, R., 1991: Lehrbuch der Ökologie. Gustav Fischer Verlag Jena. 657 S.

Schulze, E. D., 1970: Der CO2 - Gaswechsel der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Abhängigkeit von den Klimafaktoren im Freiland. Flora 159: 177-232.

Schumacher, F. X., 1939: A new growth curve and its application to timber yield studies. J. of Forestry 37: 819-820.

Schumann, K., 2002: Eingriffsanalyse im Forstamt Bovenden. Unveröff. Manuskript.

Schütz, J.-Ph., 1989: Der Plenterbetrieb. Unterlage zur Vorlesung Waldbau III, ETH Zürich: 54 S.

Schwappach, A., 1890: Wachstum und Ertrag normaler Fichtenbestände. Julius Springer Verlag. 100 S.

Schwappach, A., 1905: Untersuchungen über die Zuwachsleistungen von Eichen-Hochwaldbeständen in Preussen. Neumann Verlag. 131 S.

Schwappach, A., 1911: Die Rotbuche. Neumann Verlag, Neudamm.

Seidling, W., 1997: 50 Jahre Vegetationsentwicklung auf einer Schlagfläche im osthessischen Bergland. FwCbl. 116, 218-231.

Shafer, G. N., 1988: A Site Growth Model for *Pinus eliottii* in the Southern Cape. S. Afr. For. J. 146: 12-17.

Shafer, G. N., 1989: Site Indicator Species for Predicting Productivity of Pine Plantations in the Southern Cape. S. Afr. For. J. 148: 7-17.

Shannon, C.E. u. Weaver, W., 1949: The mathematical theory of communication. University of Illinois Press, Urbana.

Sharpe, P. J. H., 1990: Forest modeling approaches - compromises between generality and precision. In: Dixon, Mehldal, Ruark, Warren (eds.): Process Modeling of Forest Growth Responses to Environmental Stress; Timber Press, Portland, Oregon: 21-32.

Shugart, H. H., 1984: A theory of forest dynamics: the ecological implication of forest successsion models. Springer, New York. 278 S.

Shumway, R. H., 1988: Applied statistical time series analysis. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 379 pp. *ISBN* 0-13-041500-6.

Shvidenko, A., Venevsky, S., Raille, G. u. Nilsson, S., 1995: A system for evaluation of growth and mortality in Russian forests. Water, Air and Soil Pollution 82: 333-348.

Sievänen, R., 1993: A process-based model for the dimensional growth of even-aged stands. Scand. J. For. Res. 8: 28-48.

Skovsgaard, J. P. u. Mosing, M., 1996: Bogefoyngelser i Ostjylland. Danish Forest and Landscape Research Institute.

Sloboda, B., 1971: Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differntialgleichungen erster Ordnung. Mitt. Bad.-Württemb. Forstl. Vers. u. Forsch. Anstalt. Heft 32.

Sloboda, B., 1976: Mathematische und stochastische Modelle zur Beschreibung der Statik und Dynamik von Bäumen und Beständen – insbesondere das bestandesspezifische Wachstum als stochastischer Prozeß. Habil.-Schrift, Univ. Freiburg, 310 S.

Sloboda, B., 1984: Bestandesindividuelles biometrisches Schaftformmodell zur Darstellung und zum Vergleich von Formigkeit und Sortimentausbeute sowie Inventur. Tagungsbericht d. Sektion Ertragskunde, Neustadt.

Smalley, G. W. u. Bailey, R. L., 1974: Yield tables and stand structure for shortleaf pine plantations in Tennessee, Alabama and Georgia highlands. USDA For. Service Res. Paper SO-97.

Smaltschinski, T., 1981: Bestandesdichte und Verteilungsstruktur. Dissertation, Universität Freiburg.

Sonntag, M., 1998: Klimaveränderungen und Waldwachstm – Treedyn Simulationen mit einer Analyse modellstruktureller Unsicherheiten. Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag Aachen: 160 S.

Souter, R. A., 1986: Dynamic stand structure in thinned stands of naturally regenerated loblolly pine in the Georgia Piedmont. Ph. D. Thesis. University of Georgia. Athens, GA.

Späth, H., 1973: Spline-Algorithmen zur Konstruktion glatter Kurven und Flächen. Oldenbourg, München.

Speidel, G., 1972: Planung im Forstbetrieb. Grundlagen und Methoden der Forsteinrichtung. Verlag Parey, Hamburg und Berlin. 267 S.

Spellmann, H., 1998: Überführung als betriebliche Aufgabe. Forst und Holz, 54 (4): 110-116.

Spiecker, H., 1995: Ein Vergleich natürlicher und pflegebedingter Selektionsprozesse. Mitt. d. Forstl. Vers. Anstalt Rhld-Pfalz, Nr. 34 161-179.

Spiecker, M., 1994: Wachstum und Erziehung wertvoller Waldkirschen. Mitt. d. Forstl. Vers. u. Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Heft 181.

Sprugel, D. G., 1991: Disturbance, Equilibrium, and Environmental Variability - what is Natural Vegetation in a Changing Environment. Biological Conserv. 58: 1-18.

Spurr, S. H., 1962: A measure point density. For. Sci. 8: 85-96.

Staupendahl, K., 1997: Ein neues Stichprobenverfahren zur Erfassung und Beschreibung von Naturverjüngung. Vortrag anlässlich der Jahrestagung der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik des Deutschen Verbandes Forstlicher Versuchsanstalten am 24. 9. 97 in Freiburg.

Staupendahl, K., u. Puumalainen, J., 1999: Modellierung des Einflusses von Durchforstungen auf die Durchmesserverteilung von gleichaltrigen Fichtenreinbeständen. Cbl. ges. Forstw. 116 (4): 249-262.

Steingaß, F., 1995: Beschreibung der Schaftprofile von Douglasien. Diplomarbeit, Fachbereich Forstwissenschaft, Universität Göttingen.

Sterba, H., 1975: Assmann´s Theorie der Grundflächenhaltung und die "Competition-Density-Rule" der Japaner Kira, Ando und Tadaki. Cbl. ges. Forstw. 92 (1): 46-62.

Sterba, H., 1981: Natürlicher Bestockungsgrad und Reinecke's SDI. Cbl. ges. Forstw. 98 (2): 101-116.

Sterba, H., 1983: Single stem models from inventory data with temporary plots. Mitt. D. Forstl. Bundesversuchsanstalt Wien Nr. 147: 87-101.

Sterba, H., 1990: Validitätsprüfung des Einzelbaumsimulators für Fichten-Kiefern-Mischbestände. Tagungsbericht. Dt. Verb. Forstl. Forschungsanstalten - Sektion Ertragskunde: 101-117.

Sterba, H., 1991: Forstliche Ertragslehre. Lecture Notes: 159 S.

Sterba, H., 1997: Waldwachstumsforschung – zwischen Erkenntnisdrang und Praxisanspruch. AFJZ 168 (11-12): 227-230.

Sterba, H., 1998: Das Randproblem bei der Erfassung von Strukturparametern. Vortrag am 25. 6. 1998, Fak. f. Forstw. u. Waldökologie, Univ. Göttingen.

Stöhr, F. K., 1968: Erweiterungsmöglichkeiten der Winkelzählprobe. Diss., Albert-Ludwig-Univ. Freiburg/Br. 83 S.

Stoyan, D. u. Stoyan, H., 1992: Fraktale Formen Punktfelder. Methoden der Geometrie-Statistik. Akademie-Verlag, Berlin. 394 p.

Struck, G., 1999: Effekte von Pflanzverband, Kulturdüngung und Schlagräumung am Beispiel junger Traubeneichenbestände. Diss., Fak. f. Forstwiss. u. Waldökologie, Univ. Göttingen: 196 S.

Sturm, K., 1994: Naturnahe Waldnutzung in Mitteleuropa. Studie im Auftrag von Greenpeace Deutschland.

Suzuki, T., 1971: Forest Transition as a Stochastic Process. Mitt. FBVA Wien. Heft 91: 137-150.

Suzuki, T., Ohsaki, K., Sato, H. u. Yamamoto, Y., 1992: A representation method for todo fir Shapes Using Computer Graphics. J. of the Jap. For. Soc. 74 (6): 504-508.

Swindel, B. F., Smith, H. D. u. Grosenbaugh, L. R., 1987: Fitting diameter distributions with a hand-held programmable calculator. Scand. J. For. Res. 2: 325-334.

Szaro, R. C. u. Johnston, D. W., 1996: Biodiversity in Managed Landscapes. Oxford University Press: 778 p.

Teepe, R., Brumme, R. u. Beese, F., 2000: Der Einfluß der Bodenverdichtung bei der Holzernte auf den Austausch der Spurengase CO_2, CH_4 und N_2O. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben der Deutschen Bundesstiftung Umwelt.

Temesgen, H. u. Gadow, K. v., 2003: Generalized Height-diameter Models for Major Tree Species in Complex Stands of Interior British Columbia. Eingereicht Forstwiss. Centralblatt.

Thomasius, H., 1963: Untersuchungen über die Brauchbarkeit einiger Wachstumsgrößen von Bäumen und Beständen für die qualitative Standortsbeurteilung. Archiv für Forstwesen 12 (12): 1267-1323.

Thomasius, H., 1978: Modell des gleichaltrigen Reinbestandes. TU Dresden, Sektion Forstwirtschaft, Tharandt, II Vorträge: 122-148.

Thomasius, H., 1988: Stabilität natürlicher und künstlicher Waldökosysteme sowie deren Beeinflußbarkeit durch forstliche Maßnahmen. AFZ No. 43: 1037-1043, 1064-1068.

Thomasius, H., 1996: Geschichte, Anliegen und Wege des Waldumbaus in Sachsen. Schriftenreihe d. Sächs. Landesanst. f. Forsten 6/96: 11-52.

Thomasius, H., 2001: 50 Jahre Arbeitsgemeinschaft Naturgemässe Waldwirtschaft - Dauerwaldbewirtschaftung. Der Dauerwald, 24: 15-39.

Thomasius, H. O. u. Thomasius, H., 1976: Anwendungsbeispiel zu einem Verfahren der Berechnung ertragskundlich optimaler Bestandesdichtewerte und Diskussion dieses Verfahrens. Informationen TU Dresden, Sektion Forstwirtschaft, Bereich Waldbau und Forstschutz, Tharandt: 21-76.

Thomasius, H. O. u. Thomasius, H., 1978: Ableitung eines Verfahren zur Berechnung der ertragskundlich optimalen Bestandesdichte. Beiträge f. d. Forstwirtschaft 12 (79).

Tomé, M. u. Burkhart, H. E., 1989: Distance-Dependent Competition Measures for Predicting Growth of Individual Trees. Forest Science 35(3): 816-831.

Tomppo, E., 1986: Models and Methods for Analysing Spatial Patterns of Trees. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae No. 138, Helsinki: 65pp.

Torres Rojo, J. M. u. Brodie, J. D., 1990: Adjacency constraints in harvest scheduling. Can. J. of For. Res. 20: 978-986.

Trincado, G. u. Gadow, K. v., 1996: Zur Sortimentschätzung stehender Laubbäume. Clbl. ges. Forstw. 1, 27-38.

Trincado, G., Quezada, P. R. u. Gadow, K. v., 2003: A Comparison of two stand table projection methods for young *Eucalyptus nitens* (Maiden) plantations in Chile. Forest Ecology and Management. 180: 443-451.

Trincado, G., Kiviste, A. u. Gadow, K. v., 2003: Preliminary site index models for native Roble (*Nothofagus obliqua*) and Raulí (*N. alpina*) in Chile. New Zealand J. of Forestry Science 32 (3): 322-333.

Trincado, G., Gadow, K. v. u. Tewari, V. P., 1996: Comparison of three stem Profile Equations for *Quercus robur* L. South African Forestry Journal 177: 23-29.

Turner, J., Thompson, C. H., Turvey, N. D., Hopmans, P. u. Ryan, P. J., 1990: A soil technical classification for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. I. Development. Aust. J. Soil Res. 28: 797-811.

Turton, S. M., 1985: The radiative distribution of photosynthetically active radiation within four tree canopies, Craigieburn Range, New Zealand. Austr. For. Res. 15: 363-394.

Turvey, N. D., Booth, T. H. u. Ryan, P. J., 1990: A soil technical classification for *Pinus radiata* (D. Don) plantations. II. A basis for estimation of crop yield. Aust. J. Soil Res. 28: 813-824.

Ulrich, B., 1986: Stoffhaushalt von Waldökosystemen. Bioelement-Haushalt. Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen.

Ulrich, B., Pirouzpanah, D. u. Murach, D., 1984: Beziehungen zwischen Bodenversauerung und Wurzelentwicklung von Fichten mit unterschiedlich starken Schadsymptomen. Forstarchiv 55; 127-134.

Ung, C.-H., Raulier, F., Oullet, D. u. Dhôte, J.-F., 1997: L'indice de compétition interindividuelle de Schütz. Can. J. For. Res. 27: 521-526.

Ung, C-H. 1993. Growth and branchiness of *Picea mariana* (Mill.) BSP. In Canadian Forest Service Modelling Working Group. Proc. of the seventh annual meeting and workshop, pp. 9. *ISBN* 0-662-21104-9.

Upton, G. u. Fingleton, B., 1990: Spatial Data Analysis by Example. John Wiley, 409 S.

Van der Meer, P. J., 1995: Canopy dynamics of a tropical rain forest in French Guiana. Diss., Landbouwuniversiteit Wageningen.Wegener, G. 1995: Perspektiven der Holznutzung. FwCbl. 114(2): 97-106.

Van Laar, A. u. Akça, A., 1997: Forest Mensuration. Cuvillier Verlag Göttingen, 418 pp. ISBN 3-89588-874-5.

Vanclay, J. K., 1989: Site productivity assessment in rainforests: an objective approach using indicator species. In: Wan Razali Mohd, H.T. Chan, S. Appanah (Editors), Proceedings of the Seminar on Growth and Yield in Tropical Mixed / Moist Forests, 20-24 June 1988, Kuala Lumpur. Forest Research Institute, Malaysia: 225-241.

Vanclay, J. K., 1992: Assessing site productivity in tropical moist forests: a review. Forest Ecology and Management 54: 257-287.

Vanclay, J. K., 1994: Modelling forest growth - applications to mixed tropical forests. CAB International, Wallingford, UK.

Vanclay, J., 1998: Towards more rigorous assessment of biodiversity. In: Bachmann, P., Köhl, M. and Päivinen, R., (eds), 1998: Assessment of biodiversity for improved forest planning. Kluwer Academic Publishers: 211-232.

Vincent, J. R. et al. 1990: Modelling forest sector dynamics - challenges for the future analysis. XIX IUFRO World Congress. Montreal. Div. 4: 445-449.

Walter, H., 1960: Einführung in die Phytologie - III. Grundlagen der Pflanzenverbreitung - 1. Teil: Standortslehre. Stuttgart.

Wang, Y. P. u. Jarvis, P. G., 1990: Description and validation of an array model - MAESTRO. Agricultural and Forest Meteorology 51: 257-280.

Webb, L. J., 1959: A physiognomic classification of Australian rainforests. J. Ecol. 47: 551-570.

Weise, W., 1880: Ertragstafeln für die Kiefer. Julius Springer Verlag, 156 S.

Wenk, G., Antanaitis, V. u. Smelko, S., 1990: Waldertragslehre. Deutscher Landwirtschaftsverlag. Berlin. 448 S.

Wenk, G., Römisch, K. u. Gerold, D., 1985: DDR-Fichtenertragstafel 1984. Technische Universität Dresden, Sektion Forstwissenschaft, Tharandt.

Wensel, L., Meerschaert, W. u. Biging, G., 1987: Tree Heigh and Diameter Growth Models for Northern California Conifers, Hilgardia, University of California, Volume 55, No. 8.

Wiant, H. V., Wood, G. B. u. Gregoire, T. G., 1992: Practical guide for estimating the volume of a standing sample tree using either importance or centroid sampling. For. Ecol. and Mgmt. 49: 333-339.

Wiedemann, E., 1931: Die Rotbuche. Mitteilung aus Forstwirtschaft und Forstwissenschaft, 96 S.

Wiedemann, E., 1936: Die Fichte. Schaper Verlag, Hannover.

Wiedemann, E., 1942: Der gleichaltrige Buchen-Fichten-Mischbestand. Mitt. a. Forstwirtschaft und Forstwissensschaft 13: 1-88.

Wiedemann, E., 1949: Ertragstafeln der wichtigsten Holzarten. Schaper Verlag, Hannover.

Wimmenauer, E., 1914: Ertrags- und Sortimentuntersuchungen im Buchenhochwald. Mitteilungen aus dem forstlichen Versuchswesen Badens, 140 S.

Windhager, M., 1999: Evaluierung von vier verschiedenen Waldwachstumssimulatoren. Diss., Universität für Bodenkultur Wien, 217 S.

Yang, Y. Ch. U. Feng, F. L., 1989: The application of parameter prediction models and paramter recovery methods to the analysis of tree growth and stand structure in Taiwan. Q. Journ. Chin. For., 22(1):53-71.

Zeide, B. u. Gresham, C. A., 1991: Fractal dimensions of tree crowns in three loblolly pine plantations of coastal South Carolina. Can. J. For. Res. 21(8): 1208-1212.

Zeide, B. u. Pfeifer, P., 1991: A method for estimation of fractal dimension of tree crowns. For. Sci. 37(5): 1253-1265.

Zenner, E. K. u. Hibbs, D. E., 2000: A new method for modeling the heterogenity of forest structure. Forest Ecology and Management. 129(1): 75-87.

Zoth, R. u. Block, J., 1992: Untersuchungen an Wurzelballen sturmgeworfener Bäume in Reinland-Pfalz. Forst und Holz 47(18); 566-571.