

MÔ HÌNH HÓA PHÂN BỐ SỐ CÂY THEO ĐƯỜNG KÍNH VÀ CHIỀU CAO TRONG RỪNG TRỒNG KEO TẠI TƯỢNG KINH DOANH GỖ NHỎ VÀ GỖ LỚN TẠI TỈNH TUYỀN QUANG

Lê Đức Thắng¹, Đào Thị Thu Hà^{2,*}, Nguyễn Thị Thanh³

¹ Trung tâm Nghiên cứu Dữ liệu Tam Đảo, Viện Dữ liệu

² Trường Đại học Tân Trào

³ Viện Phát triển Khoa học và Công nghệ Vùng, Viện Ứng dụng công nghệ

*Email: daothuhayfu@gmail.com

TÓM TẮT

Mô hình hóa phân bố tần suất đường kính và chiều cao là nền tảng khoa học quan trọng trong phân tích cấu trúc lâm phần và quản lý rừng bền vững. Nghiên cứu này nhằm xác định hàm phân phối xác suất tối ưu để mô phỏng phân bố số cây theo đường kính (N/D) và theo chiều cao (N/H) của rừng trồng Keo tai tượng theo hai định hướng kinh doanh gỗ nhỏ và gỗ lớn tại tỉnh Tuyền Quang, dựa trên dữ liệu thu thập từ 15 ô tiêu chuẩn đại diện cho các cấp tuổi 6 - 11 năm. Mười hai hàm phân phối xác suất, bao gồm các phân phối cổ điển và các phân phối linh hoạt trong khung mô hình GAMLSS, được đánh giá thông qua phương pháp ước lượng hợp lý tối đa (MLE) kết hợp với các kiểm định Kolmogorov-Smirnov và Anderson-Darling. Kết quả cho thấy, các hàm phân phối linh hoạt thuộc họ Box-Cox, đặc biệt là Box-Cox Power Exponential (BCPE), thể hiện mức độ phù hợp và tính ổn định vượt trội trong mô phỏng cả phân bố N/D và N/H ở hầu hết các độ tuổi lâm phần. Phân phối BCPE mô phỏng hiệu quả các phân bố có độ lệch và đuôi dài ở giai đoạn rừng gỗ nhỏ, đồng thời duy trì ưu thế khi cấu trúc lâm phần ổn định hơn trong giai đoạn rừng gỗ lớn. Ngược lại, các phân phối truyền thống như Weibull và Gamma chỉ đạt mức phù hợp trung bình, trong khi phân phối Exponential không phù hợp trong tất cả các trường hợp. Những kết quả này cung cấp cơ sở khoa học tin cậy cho dự báo sinh trưởng và hỗ trợ quản lý rừng trồng keo tai tượng theo hướng kinh doanh gỗ lớn và phát triển bền vững.

Từ khóa: Phân bố N-D, phân bố N-H, keo tai tượng, hàm phân phối xác suất, GAMLSS, quản lý rừng bền vững.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Rừng trồng keo hiện chiếm trên 2,2 triệu ha, tương đương khoảng 60% diện tích rừng trồng sản xuất ở Việt Nam, trong đó keo tai tượng (*Acacia mangium*) là một trong những loài chủ lực nhờ sinh trưởng nhanh, biên độ sinh thái rộng và chất lượng gỗ tương đối tốt. Tuy nhiên, phần lớn diện tích rừng keo vẫn đang được kinh doanh theo chu kỳ ngắn (4 - 6 năm), chủ yếu phục vụ sản xuất dăm gỗ, giấy và ván bóc, với giá trị gia tăng thấp [1]. Trong khi đó, các mô hình sản xuất gỗ lớn được chứng minh có thể làm tăng đáng kể trữ lượng và giá trị thương phẩm lên 2 - 3 lần [2]. Trong bối cảnh nhu cầu về gỗ xẻ, gỗ chất lượng cao và gỗ có chứng chỉ bền vững (FSC) ngày càng gia tăng, việc chuyển hóa rừng trồng gỗ nhỏ

sang rừng gỗ lớn được xem là một hướng đi tất yếu nhằm nâng cao hiệu quả kinh tế và tính bền vững của sản xuất lâm nghiệp.

Để quản lý, quy hoạch và phát triển rừng trồng theo hướng hiệu quả và bền vững, việc hiểu rõ cấu trúc lâm phần, đặc biệt là quy luật phân bố số cây theo đường kính và chiều cao, có ý nghĩa quan trọng trong dự báo sinh trưởng, xác định chế độ nuôi dưỡng và định hướng kinh doanh rừng gỗ lớn. Phân bố số cây theo đường kính và chiều cao không chỉ phản ánh trạng thái sinh trưởng của lâm phần mà còn là cơ sở khoa học cho việc xây dựng các mô hình tăng trưởng, dự báo sản lượng và đề xuất các giải pháp kỹ thuật lâm sinh phù hợp.

Trên thế giới và tại Việt Nam, nhiều nghiên cứu đã sử dụng các hàm phân phối xác suất như:

Normal, Lognormal, Gamma, Weibull và các họ phân phối linh hoạt khác để mô tả cấu trúc rừng và dự báo động thái lâm phần. Các nghiên cứu được thực hiện trên nhiều đối tượng rừng trồng khác nhau như rừng keo tai tượng ở tỉnh Hòa Bình trước đây [3], khu vực Ba Vì [4], tỉnh Tuyên Quang [5], rừng keo lá tràm ở vùng cát ven biển tỉnh Quảng Bình trước đây [6], rừng neem (*Azadirachta indica*) tại Ghana [7], rừng thông ở Trung Quốc [8], rừng sồi ở Iran [9] và rừng keo lá tràm tại Bangladesh [10]... Tuy nhiên, các nghiên cứu về mô hình hóa phân bố số cây đối với rừng trồng keo tai tượng kinh doanh gỗ nhỏ và gỗ lớn, đặc biệt tại khu vực miền núi phía Bắc vẫn còn hạn chế. Bên cạnh đó, phần lớn các nghiên cứu trước đây mới chỉ tập trung vào một số hàm phân phối truyền thống, trong khi việc đánh giá và so sánh một cách hệ thống các họ phân phối linh hoạt nhiều tham số vẫn chưa được quan tâm đầy đủ.

Xuất phát từ khoảng trống nghiên cứu trên, nghiên cứu này áp dụng đồng thời 12 hàm phân phối xác suất gồm: Normal (NO), Lognormal (LOGNO), Gamma (GA), Exponential (EXP), Weibull (WEI), Sinh-Arcsinh (SHASH), Johnson's SB (JSB), Inverse Gaussian (IG), Box-Cox Cole and Green (BCCG), Box-Cox Cole and Green original (BCCGo), Box-Cox Power Exponential (BCPE) và Box-Cox t (BCT) nhằm mô hình hóa quy luật phân bố số cây theo đường kính và chiều cao của rừng trồng keo tai tượng kinh doanh gỗ nhỏ và gỗ lớn tại tỉnh Tuyên Quang. Các tham số của mô hình được ước lượng bằng phương pháp hợp lý tối đa, đồng thời mức độ phù hợp của các hàm phân phối được đánh giá thông qua các kiểm định Kolmogorov-Smirnov và Anderson-Darling. Kết quả nghiên cứu không chỉ cho phép đánh giá một cách hệ thống hiệu quả của các hàm phân phối truyền thống và các họ phân phối linh hoạt nhiều tham số mà còn góp phần lựa chọn được mô hình phù hợp nhất cho từng chỉ tiêu cấu trúc lâm phần, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho quản lý, thâm canh và phát triển rừng trồng keo theo hướng hiệu quả và bền vững.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Khu vực nghiên cứu

Nghiên cứu được tiến hành tại các lâm phần keo tai tượng (*Acacia mangium* Willd.) từ 6 - 11

năm tuổi thuộc ba Công ty TNHH Lâm nghiệp (CTLN) Yên Sơn, CTLN Sơn Dương, CTLN Hàm Yên, nay thuộc tỉnh Tuyên Quang. Khu vực nghiên cứu chủ yếu trên địa hình núi thấp, độ cao 300 - 700 m, gồm các dãy núi thấp xen kẽ đồi; trên nhóm đất đỏ vàng (chiếm 67,8% diện tích tự nhiên của tỉnh), gồm 3 loại: Đất đỏ nâu trên đá vôi, đất đỏ vàng trên đá sét và đá biến chất, đất đỏ vàng; phân bố tại các huyện trước đây: Hàm Yên, Yên Sơn, Sơn Dương và phần phía Nam huyện Chiêm Hóa nay thuộc tỉnh Tuyên Quang. Thuộc vùng khí hậu nhiệt đới gió mùa đặc trưng, mùa mưa từ tháng 5 - 10 và mùa khô từ tháng 11 đến tháng 4 năm sau [11]. Trong giai đoạn 5 năm gần đây, lượng mưa trung bình năm 1.256 - 1.661 mm, trung bình 1.488 mm, với khoảng 150 ngày mưa/năm. Lượng mưa mùa mưa 994 - 1.444 mm, chiếm 73,2 - 85,5% tổng lượng mưa cả năm. Nhiệt độ trung bình năm 23,2 - 23,8°C, trong đó tháng 1 có nhiệt độ thấp nhất, còn các tháng 6 - 8 là giai đoạn nóng nhất trong năm [11].

2.2. Phương pháp nghiên cứu, kỹ thuật sử dụng

2.2.1. Điều tra trên ô tiêu chuẩn

Các lâm phần keo tai tượng được lựa chọn trong nghiên cứu đều gây trồng và quản lý theo “Quy trình tạm thời kỹ thuật trồng rừng cung cấp nguyên liệu giấy” do Tổng Công ty Giấy Việt Nam (VINAPACO) ban hành. Tại mỗi lâm phần, các ô tiêu chuẩn (OTC) tạm thời được thiết lập theo phương pháp chọn mẫu ngẫu nhiên phân tầng không theo tỷ lệ [12], nhằm đảm bảo tính đại diện cho các mô hình và cấp tuổi khác nhau.

Nghiên cứu bố trí tổng 8 mô hình trồng rừng, bao gồm: (i) 5 mô hình rừng trồng chưa chuyển hóa (rừng gỗ nhỏ) ở hai cấp tuổi 6 và 7 năm và (ii) 3 mô hình rừng trồng đã chuyển hóa (rừng gỗ lớn) ở ba cấp tuổi 9, 10 và 11 năm. Mỗi OTC có diện tích 500 m² (20 × 25 m). Tổng cộng có 15 OTC được thiết lập và điều tra. Cụ thể, các mô hình rừng trồng chưa chuyển hóa gồm: Mô hình 1 (MH1: 2 ô tuổi 6, thuộc CTLN Hàm Yên), MH2 (1 ô tuổi 6, CTLN Sơn Dương), MH3 (3 ô tuổi 6, CTLN Yên Sơn), MH4 (1 ô tuổi 7, CTLN Hàm Yên) và MH5 (3 ô tuổi 7, CTLN Yên Sơn). Các mô hình rừng trồng đã chuyển hóa gồm: MH6 (2 ô tuổi 9, CTLN Yên Sơn), MH7 (2 ô tuổi 10, CTLN Yên Sơn) và MH8 (1 ô tuổi 11, CTLN Sơn Dương).

Trong mỗi OTC, toàn bộ cây keo tai tượng được đo đếm chỉ tiêu sinh trưởng cơ bản, bao gồm: Đường kính ngang ngực ($D_{1,3}$ cm), được đo thông qua chu vi tại vị trí 1,3 m tính từ mặt đất bằng thước dây, với độ chính xác 0,1 cm; chiều cao vút ngọn (H_{VN} , m), xác định từ gốc đến đỉnh sinh trưởng của thân chính bằng thước Blume–Leiss, với độ chính xác 0,1 m.

2.2.2. Phương pháp xử lý số liệu

Để mô hình hóa quy luật phân bố số cây theo đường kính (N/D) và theo chiều cao (N/H) của các lâm phần keo tai tượng, nghiên cứu sử dụng 12 hàm phân phối xác suất thuộc nhóm phân phối cổ điển và phân phối linh hoạt trong khung mô hình GAMLSS. Các phân phối được sử dụng bao

gồm: Normal (NO), Lognormal (LOGNO), Gamma (GA), Exponential (EXP), Weibull (WEI), Sinh-Arcsinh (SHASH), Johnson's SB (JSB), Inverse Gaussian (IG), Box-Cox Cole and Green (BCCG), Box-Cox Cole and Green original (BCCGo), Box-Cox Power Exponential (BCPE) và Box-Cox t (BCT).

Việc sử dụng đồng thời các phân phối có mức độ linh hoạt khác nhau cho phép đánh giá toàn diện khả năng mô tả hình dạng phân bố của dữ liệu thực nghiệm, bao gồm các đặc trưng về độ lệch, độ nhọn và độ bất đối xứng, từ đó lựa chọn hàm phân phối phù hợp nhất cho từng mô hình và cấp tuổi nghiên cứu.

Bảng 1. Hàm phân phối xác suất được áp dụng cho các trạng thái rừng tự nhiên

Hàm phân phối xác suất	Công thức	
Normal (NO)	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$ [13]	(1)
Lognormal (LOGNO)	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - \mu)^2/2\sigma^2}$ [14]	(2)
Gamma (GA)	$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot e^{(-x/\beta)}$ [15]	(3)
Exponential (EXP)	$f(x) = \lambda e^{(-\lambda x)}$ [16]	(4)
Weibull (WEI)	$f(x) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{(-x/\beta)^\alpha}$ [17]	(5)
Johnson's S_B (JSB)	$f(x) = \frac{\delta}{\lambda\sqrt{2\pi} z(1-z)} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\gamma + \delta \ln\left(\frac{z}{1-z}\right)\right)^2\right)$ [18]	(6)
Sinh-Arcsinh (SHASH)	$f(x) = \frac{\delta}{\eta} \sqrt{\frac{1+z^2}{2\pi(1+y^2)}} \exp\left(-\frac{1}{2}S^2\right)$ [19]	(7)
Inverse Gaussian (IG)	$f(x) = \left(\frac{1}{2\pi\phi x^3}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\mu^2\phi x}\right)$ [20]	(8)
Box-Cox Cole and Green (BCCG)	$f(y \mu, \sigma, v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{y^{v-1}}{\mu^v} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right), z = \frac{(y/\mu)^v - 1}{v\sigma}$ [21]	(9)
Box-Cox Cole and Green original (BCCGo)	$f(y \mu, \sigma, v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{y^{v-1}}{\mu^v} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right), z = \frac{(y^v - 1)/v - \mu}{\sigma}$ [21, 22]	(10)
Box-Cox Power Exponential (BCPE)	$f(y \mu, \sigma, v, \tau) = \frac{y^{v-1} \tau \exp\left[-\frac{1}{\tau}\left \frac{y}{\mu}\right ^\tau\right]}{\mu^v \sigma \tau 2^{(1+\tau/2)} \Gamma\left(\frac{1}{\tau}\right)}$ [22]	(11)
Box-Cox t (BCT)	$f(y \mu, \sigma, v, \tau) = \frac{y^{v-1}}{\mu^v \sigma} \frac{\Gamma[(\tau+1)/2]}{\Gamma(1/2)\Gamma(\tau/2)\tau^{0.5}} [1 + (1/\tau)z^2]^{-(\tau+1)/2}$ [22]	(12)

Các tham số của từng hàm phân phối được ước lượng bằng phương pháp ước lượng hợp lý tối đa (Maximum Likelihood Estimation - MLE). Mức độ phù hợp của các mô hình phân phối được đánh giá thông qua sự kết hợp giữa tiêu chí Akaike Information Criterion (AIC) và các kiểm định độ phù hợp phân phối. Trong đó, mô hình có giá trị AIC nhỏ nhất được xem là mô hình tối ưu, với AIC được xác định theo công thức [23]:

$$AIC = \text{Residual Deviance} + 2x \quad (13)$$

Trong đó: x là số tham số của mô hình.

Bên cạnh tiêu chí AIC, sự khác biệt giữa phân phối lý thuyết và phân phối thực nghiệm được kiểm định bằng hai tiêu chuẩn thống kê phi tham số, bao gồm Kolmogorov-Smirnov (K-S) và Anderson-Darling (A-D).

Kiểm định Kolmogorov-Smirnov [24], [23] được xác định thông qua giá trị thống kê:

$$D_n = \sup x |F(x_i) - F_0(x_i)| \quad (14)$$

$$D\alpha = \sqrt{\frac{-\ln\left(\frac{1}{2}\alpha\right)}{2n}} \quad (15)$$

Trong đó: $\sup x$ = giá trị cận trên đúng của biến x (D , H); n là cỡ mẫu; $F(x_i)$ là hàm phân phối tần suất tích lũy thực nghiệm của các quan sát cho các đối tượng x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); $F_0(x_i)$ là xác suất của tần suất tích lũy lý thuyết ước tính.

Kiểm định Anderson - Darling [25, 26], [23] được xác định thông qua công thức:

$$AD = -n - S$$

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)}{n} [\ln F(x_i) + \ln(1 - F(x_{n-i+1}))] \quad (16)$$

Ngoài ra, để kiểm định mức độ phù hợp tổng thể giữa phân phối lý thuyết và dữ liệu quan sát, nghiên cứu còn áp dụng kiểm định khi bình phương (*Chi-squared test*, χ^2), với giả thuyết H_0 : “Dữ liệu tuân theo phân phối giả định”. Mức ý nghĩa được lựa chọn là $\alpha = 0,05$. Giả thuyết H_0 bị bác bỏ khi $P\text{-value} < 0,05$; ngược lại, $P\text{-value} \geq 0,05$, mô hình được xem là phù hợp với dữ liệu quan sát.

Giá trị thống kê khi bình phương (χ^2) [27], [23], được xác định theo công thức:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k (O_i - E_i)^2 / E_i \quad (17)$$

Trong đó: O_i là tần suất quan sát thực nghiệm của phân phối thứ i ; E_i là tần suất lý thuyết ước tính của phân phối thứ i .

Các hàm phân phối thỏa mãn đồng thời tiêu

chí AIC và các kiểm định độ phù hợp được xếp hạng dựa trên giá trị thống kê D của kiểm định (K-S) và A của kiểm định (A-D) nhằm lựa chọn mô hình tối ưu.

Toàn bộ dữ liệu điều tra được tổng hợp và xử lý trên môi trường R [23], [28]. Các gói mở rộng được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm ggplot2 và gridExtra cho trực quan hóa dữ liệu, nortest cho các kiểm định phân phối và gamlss cho ước lượng tham số và mô hình hóa phân phối xác suất linh hoạt.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thống kê mô tả biến đường kính và chiều cao các mô hình trồng rừng keo tai tượng sản xuất gỗ nhỏ và gỗ lớn

Kết quả thống kê mô tả (Bảng 1) cho thấy, các đặc trưng mẫu của đường kính ($D_{1,3}$) và chiều cao vút ngọn (H_{VN}) khác biệt rõ rệt giữa mô hình sản xuất gỗ nhỏ và gỗ lớn. Ở các lâm phần gỗ nhỏ (6 - 7 năm tuổi), đường kính và chiều cao trung bình chỉ đạt lần lượt 12,52 - 13,79 cm và 14,07 - 15,31 m, với độ lệch chuẩn (SD) tương đối cao, lần lượt là 2,74 - 2,88 cm về đường kính; 2,53 - 2,89 m về chiều cao và phân bố lệch trái nhẹ do mật độ dày và cạnh tranh mạnh. Ngược lại, mô hình gỗ lớn (9 - 11 năm tuổi) đường kính trung bình đạt 14,50 - 16,20 cm và chiều cao 15,04 - 17,02 m, đồng thời có mức phân tán thấp hơn (SD: 2,38 - 2,69 cm và 2,26 - 2,55 m), phân bố cân bằng hơn khi giá trị trung bình, trung vị và mode tiệm cận nhau. Kết quả cho thấy, thời gian sinh trưởng kéo dài kết hợp tia thưa đã cải thiện đáng kể sinh trưởng và tính đồng đều của lâm phần.

Kết quả thống kê mô tả cho thấy, sự khác biệt rõ về cấu trúc lâm phần giữa hai mô hình gỗ nhỏ và gỗ lớn. Mô hình gỗ nhỏ có mức biến động kích thước cây lớn hơn, với hệ số biến thiên (CV) của đường kính từ 13,3 - 23,2% và chiều cao từ 13,2 - 19,8%. Ngược lại, mô hình gỗ lớn có mức biến động thấp và đồng đều hơn, với CV chỉ từ 4,6 - 7,4% về đường kính và 4,7 - 5,8% về chiều cao. Điều này cho thấy, lâm phần gỗ lớn có cấu trúc ổn định, phân bố gần chuẩn hơn, trong khi lâm phần gỗ nhỏ có phân bố phân tán và kém đồng đều. Đây là cơ sở để lựa chọn hàm phân bố phù hợp trong mô hình hóa cấu trúc lâm phần và đánh giá hiệu quả kinh doanh của hai mô hình.

Bảng 1. Thống kê mô tả đặc trưng mẫu biến đường kính và chiều cao lâm phần keo tai tượng sản xuất gỗ nhỏ và gỗ lớn

Mô hình		Tuổi	Chỉ tiêu	Trung bình	Sai số	Trung vị	Mode	Sai tiêu chuẩn	Phương sai mẫu	Độ nhọn	Độ lệch
Mô hình sản xuất gỗ nhỏ	MH1	6	D _{0,0} (cm)	12,70	0,522	9,10	14,00	2,760	7,620	-1,170	-0,253
			H _{VN} (m)	14,07	0,544	9,00	15,00	2,879	8,291	-1,045	-0,358
		6	D _{1,3} (cm)	13,15	0,346	9,90	14,00	2,677	7,164	-0,938	-0,440
			H _{VN} (m)	14,52	0,372	10,00	17,00	2,885	8,322	-0,762	-0,491
	MH2	6	D _{1,3} (cm)	13,56	0,231	10,70	14,70	2,740	7,509	-0,806	-0,296
			H _{VN} (m)	14,97	0,229	13,00	17,00	2,723	7,413	-0,281	-0,517
	MH3	6	D _{1,3} (cm)	13,91	0,134	11,70	12,50	2,406	5,790	-0,441	-0,255
			H _{VN} (m)	15,43	0,142	14,00	17,00	2,535	6,428	-0,137	-0,438
		6	D _{1,3} (cm)	13,86	0,126	11,90	15,00	2,431	5,909	-0,429	-0,283
			H _{VN} (m)	15,41	0,133	14,00	17,00	2,569	6,597	-0,190	-0,446
		6	D _{1,3} (cm)	13,86	0,116	11,90	15,00	2,366	5,598	-0,357	-0,258
			H _{VN} (m)	15,40	0,124	14,00	17,00	2,527	6,385	-0,164	-0,424
	MH4	7	D _{1,3} (cm)	13,62	0,317	10,70	15,50	2,989	8,935	-0,907	-0,366
			H _{VN} (m)	14,82	0,307	13,00	17,00	2,898	8,399	-0,293	-0,605
	MH5	7	D _{1,3} (cm)	13,76	0,193	11,70	12,50	2,609	6,807	-0,569	-0,329
			H _{VN} (m)	15,19	0,196	14,00	17,00	2,656	7,057	-0,175	-0,502
		7	D _{1,3} (cm)	13,76	0,159	11,70	12,50	2,431	5,908	-0,370	-0,286
			H _{VN} (m)	15,25	0,163	14,00	17,00	2,493	6,213	0,024	-0,485
7		D _{1,3} (cm)	14,07	0,145	11,70	12,50	2,430	5,905	-0,300	-0,366	
		H _{VN} (m)	15,61	0,152	14,00	17,00	2,534	6,419	0,030	-0,517	
Mô hình sản xuất gỗ lớn	MH6	9	D _{0,0} (cm)	14,04	0,111	11,90	15,00	2,364	5,591	-0,358	-0,362
			H _{VN} (m)	15,60	0,119	14,00	17,00	2,536	6,434	-0,154	-0,511
		9	D _{1,3} (cm)	14,22	0,109	11,90	15,00	2,399	5,757	-0,386	-0,421
			H _{VN} (m)	15,74	0,114	14,00	17,00	2,515	6,324	-0,077	-0,607
	MH7	10	D _{1,3} (cm)	14,34	0,104	11,90	15,00	2,364	5,591	-0,286	-0,512
			H _{VN} (m)	15,85	0,108	14,00	17,00	2,468	6,089	0,075	-0,696
		10	D _{1,3} (cm)	14,53	0,103	12,10	15,00	2,426	5,887	-0,304	-0,512
			H _{VN} (m)	16,02	0,106	14,00	17,00	2,493	6,217	0,086	-0,735
	MH8	11	D _{1,3} (cm)	14,74	0,105	12,50	15,00	2,534	6,423	-0,328	-0,436
			H _{VN} (m)	16,20	0,106	14,20	17,00	2,556	6,535	0,075	-0,696

Ghi chú: Mode là trị số ứng với tần số phân bố tập trung nhất.

3.2. Mô hình phân phối xác suất của N/D và N/H các mô hình trồng rừng keo tai tượng sản xuất gỗ nhỏ và gỗ lớn

Kết quả kiểm định mức độ phù hợp của 12 hàm phân phối xác suất với phân bố N/D rừng trồng keo tai tượng tại tỉnh Tuyên Quang cho thấy, giá trị AIC có sự khác biệt rõ rệt giữa các hàm phân phối và giữa hai mô hình (Bảng 2). Nhìn chung, các phân phối thuộc nhóm GAMLSS, đặc biệt là BCPE và BCCG/BCCGo, cho giá trị AIC thấp nhất hoặc gần thấp nhất ở hầu hết các mô hình, phản ánh mức độ phù hợp cao. Ngược lại, phân phối EXP luôn cho giá trị AIC lớn nhất, cho thấy kém phù hợp để mô phỏng cấu trúc N/D của rừng keo tai tượng.

Ở mô hình sản xuất gỗ nhỏ (6 - 7 năm tuổi), phân phối BCPE liên tục cho giá trị AIC thấp nhất,

phù hợp hơn so với các phân phối truyền thống như NO, LOGNO, GA và WEI. Kết quả này cho thấy, BCPE mô phỏng tốt phân bố N/D lệch phải và có đuôi dài, đặc trưng của lâm phần giai đoạn đầu khi cạnh tranh sinh trưởng còn mạnh. Đối với mô hình gỗ lớn (9 - 11 năm tuổi), chênh lệch AIC giữa các hàm phân phối giảm dần do cấu trúc lâm phần ổn định hơn sau tía thưa. Mặc dù phân phối Weibull và Gamma cho kết quả khá tốt, BCPE vẫn duy trì mức AIC thấp nhất hoặc gần thấp nhất, đặc biệt ở tuổi 10 - 11, phản ánh khả năng mô phỏng tốt tính bất đối xứng còn tồn tại trong phân bố N/D (Bảng 2). Nhìn chung, theo tiêu chí AIC, xu hướng xếp hạng mức độ phù hợp là BCPE $\approx$ BCCG/BCCGo > SHASH > WEI $\approx$ GA > NO/LOGNO >> EXP. Do đó, BCPE là hàm phân phối phù hợp nhất để mô phỏng phân bố N/D cho rừng trồng keo tai tượng ở cả mô hình

KHOA HỌC & CÔNG NGHỆ

gỗ nhỏ và gỗ lớn, sự phù hợp của BCPE mang tính nhất quán theo độ tuổi lâm phần, đặc biệt rõ rệt ở giai đoạn chưa ổn định cấu trúc (6 - 7 năm tuổi) và

giai đoạn chuyển hóa gỗ lớn (10 - 11 năm tuổi). Ngoài ra, WEI và GA là các lựa chọn thay thế phù hợp khi cần mô hình đơn giản.

Bảng 2. Kiểm tra quy luật phân bố N/D theo các hàm phân phối cho các mô hình trồng rừng keo tại tượng sản xuất gỗ nhỏ và gỗ lớn

Mô hình		Tuổi lâm phần	Các hàm phân phối											
			NO	LOGNO	EXP	GA	WEI	SHASH	JSU	IG	BCCG	BCCGo	BCPE	BCT
Mô hình sản xuất gỗ nhỏ	MH1	6	$\mu=12,70$ $\sigma=0,99$	$\mu=2,52$ $\sigma=1,48$	$\mu=2,54$	$\mu=2,54$ $\sigma=1,51$	$\mu=2,62$ $\sigma=1,72$	$\mu=13,12$ $\sigma=1,35$ $\mu=0,17$ $\tau=0,50$	$\mu=12,50$ $\sigma=1,17$ $\mu=10,32$ $\tau=0,91$	$\mu=2,54$ $\sigma=2,74$	$\mu=12,84$ $\sigma=1,57$ $\mu=1,51$	$\mu=2,55$ $\sigma=1,57$ $\mu=1,51$	$\mu=12,67$ $\sigma=1,59$ $\mu=1,49$ $\tau=12,10$	$\mu=12,24$ $\sigma=1,10$ $\mu=3,89$ $\tau=53,06$
			AIC=139,3	AIC=141,3	AIC=200,3	AIC=140,4	AIC=138,1	AIC=140,3	AIC=142,5	AIC=141,2	AIC=141,1	AIC=141,1	AIC=131,0	AIC=141,9
		6	$\mu=13,53$ $\sigma=0,93$	$\mu=2,58$ $\sigma=1,58$	$\mu=2,60$	$\mu=2,60$ $\sigma=1,91$	$\mu=2,68$ $\sigma=1,90$	$\mu=14,13$ $\sigma=0,89$ $\mu=0,20$ $\tau=0,31$	$\mu=13,50$ $\sigma=1,00$ $\mu=9,70$ $\tau=0,91$	$\mu=2,60$ $\sigma=2,87$	$\mu=13,12$ $\sigma=1,38$ $\mu=4,55$	$\mu=2,59$ $\sigma=1,38$ $\mu=4,55$	$\mu=13,55$ $\sigma=1,55$ $\mu=4,11$ $\tau=1,13$	$\mu=13,34$ $\sigma=1,40$ $\mu=4,52$ $\tau=42,70$
			AIC=154,5	AIC=159,1	AIC=232,7	AIC=157,3	AIC=151,4	AIC=154,0	AIC=154,4	AIC=159,1	AIC=152,0	AIC=152,0	AIC=153,5	AIC=154,0
	MH2	6	$\mu=13,46$ $\sigma=0,81$	$\mu=2,58$ $\sigma=1,75$	$\mu=2,60$	$\mu=2,60$ $\sigma=1,77$	$\mu=2,67$ $\sigma=1,92$	$\mu=13,56$ $\sigma=1,02$ $\mu=0,13$ $\tau=0,24$	$\mu=13,46$ $\sigma=0,82$ $\mu=17,36$ $\tau=2,50$	$\mu=2,60$ $\sigma=3,05$	$\mu=13,48$ $\sigma=1,79$ $\mu=1,12$	$\mu=2,60$ $\sigma=1,79$ $\mu=1,12$	$\mu=13,72$ $\sigma=1,74$ $\mu=1,32$ $\tau=12,00$	$\mu=13,48$ $\sigma=1,79$ $\mu=1,13$ $\tau=15,50$
			AIC=236,1	AIC=237,9	AIC=376,4	AIC=237,0	AIC=235,9	AIC=238,4	AIC=239,9	AIC=237,8	AIC=238,1	AIC=238,1	AIC=229,7	AIC=240,1
		6	$\mu=12,81$ $\sigma=0,65$	$\mu=2,54$ $\sigma=1,90$	$\mu=2,55$	$\mu=2,55$ $\sigma=1,90$	$\mu=2,61$ $\sigma=1,98$	$\mu=12,59$ $\sigma=0,93$ $\mu=0,37$ $\tau=0,13$	$\mu=12,81$ $\sigma=0,67$ $\mu=14,98$ $\tau=1,59$	$\mu=2,55$ $\sigma=3,17$	$\mu=12,67$ $\sigma=1,90$ $\mu=0,02$	$\mu=2,54$ $\sigma=1,90$ $\mu=0,02$	$\mu=12,76$ $\sigma=1,90$ $\mu=0,29$ $\tau=1,92$	$\mu=12,67$ $\sigma=1,90$ $\mu=0,02$ $\tau=20,80$
			AIC=177,6	AIC=176,7	AIC=300,2	AIC=176,8	AIC=180,0	AIC=178,7	AIC=180,6	AIC=176,6	AIC=178,7	AIC=178,7	AIC=175,0	AIC=180,7
	MH3	6	$\mu=13,60$ $\sigma=0,94$	$\mu=2,59$ $\sigma=1,59$	$\mu=2,61$	$\mu=2,61$ $\sigma=1,62$	$\mu=2,68$ $\sigma=1,84$	$\mu=13,93$ $\sigma=1,02$ $\mu=0,05$ $\tau=0,24$	$\mu=13,60$ $\sigma=0,95$ $\mu=13,32$ $\tau=1,52$	$\mu=2,61$ $\sigma=2,88$	$\mu=13,57$ $\sigma=1,46$ $\mu=3,81$	$\mu=2,61$ $\sigma=1,46$ $\mu=3,81$	$\mu=13,76$ $\sigma=1,72$ $\mu=1,88$ $\tau=1,28$	$\mu=13,49$ $\sigma=1,42$ $\mu=3,90$ $\tau=12,26$
			AIC=249,4	AIC=255,6	AIC=377,4	AIC=252,9	AIC=246,9	AIC=250,6	AIC=251,2	AIC=255,7	AIC=249,7	AIC=249,7	AIC=249,6	AIC=251,6
		6	$\mu=13,88$ $\sigma=0,55$	$\mu=2,62$ $\sigma=2,08$	$\mu=2,63$	$\mu=2,63$ $\sigma=2,08$	$\mu=2,68$ $\sigma=2,10$	$\mu=13,70$ $\sigma=0,31$ $\mu=0,03$ $\tau=0,25$	$\mu=13,88$ $\sigma=0,56$ $\mu=12,50$ $\tau=1,79$	$\mu=2,63$ $\sigma=3,40$	$\mu=13,75$ $\sigma=2,09$ $\mu=0,22$	$\mu=2,62$ $\sigma=2,09$ $\mu=0,22$	$\mu=13,76$ $\sigma=2,08$ $\mu=0,20$ $\tau=0,78$	$\mu=13,75$ $\sigma=2,09$ $\mu=0,23$ $\tau=26,76$
			AIC=181,4	AIC=180,1	AIC=328,7	AIC=180,3	AIC=186,8	AIC=184,3	AIC=184,0	AIC=180,1	AIC=182,0	AIC=182,0	AIC=184,0	AIC=184,0
	MH4	7	$\mu=14,59$ $\sigma=1,20$	$\mu=2,65$ $\sigma=1,35$	$\mu=2,68$	$\mu=2,68$ $\sigma=1,40$	$\mu=2,76$ $\sigma=1,72$	$\mu=17,67$ $\sigma=0,94$ $\mu=0,40$ $\tau=2,00$	$\mu=15,00$ $\sigma=1,80$ $\mu=25,67$ $\tau=0,19$	$\mu=2,68$ $\sigma=2,67$	$\mu=14,31$ $\sigma=1,22$ $\mu=4,14$	$\mu=2,66$ $\sigma=1,22$ $\mu=4,14$	$\mu=14,40$ $\sigma=1,50$ $\mu=3,94$ $\tau=12,18$	$\mu=14,36$ $\sigma=1,24$ $\mu=4,12$ $\tau=21,51$
			AIC=156,2	AIC=161,8	AIC=215,5	AIC=159,5	AIC=153,1	AIC=149,9	AIC=147,8	AIC=161,8	AIC=152,0	AIC=152,0	AIC=110,3	AIC=154,0

Mô hình		Tuổi lâm phần	Các hàm phân phối											
			NO	LOGNO	EXP	GA	WEI	SHASH	JSU	IG	BCCG	BCCGo	BCPE	BCT
Mô hình sản xuất gỗ lớn	MH5	7	$\mu=14,45$ $\sigma=0,67$	$\mu=2,66$ $\sigma=2,00$	$\mu=2,67$	$\mu=2,67$ $\sigma=2,00$	$\mu=2,73$ $\sigma=2,05$	$\mu=14,26$ $\sigma=0,78$ $\mu=0,20$ $\tau=0,01$	$\mu=14,45$ $\sigma=0,69$ $\mu=15,85$ $\tau=1,63$	$\mu=2,67$ $\sigma=3,33$	$\mu=14,31$ $\sigma=2,00$ $\mu=0,11$	$\mu=2,66$ $\sigma=2,00$ $\mu=0,11$	$\mu=14,27$ $\sigma=1,94$ $\mu=1,26$ $\tau=12,86$	$\mu=14,31$ $\sigma=2,00$ $\mu=0,11$ $\tau=70,59$
			AIC=179,8	AIC=178,9	AIC=310,4	AIC=179,0	AIC=183,5	AIC=182,5	AIC=182,8	AIC=178,8	AIC=180,8	AIC=180,8	AIC=173,1	AIC=182,8
		7	$\mu=13,77$ $\sigma=0,50$	$\mu=2,62$ $\sigma=2,14$	$\mu=2,62$	$\mu=2,62$ $\sigma=2,14$	$\mu=2,68$ $\sigma=2,15$	$\mu=13,48$ $\sigma=0,54$ $\mu=0,27$ $\tau=0,10$	$\mu=13,77$ $\sigma=0,53$ $\mu=12,58$ $\tau=1,20$	$\mu=2,62$ $\sigma=3,45$	$\mu=13,57$ $\sigma=2,16$ $\mu=1,03$	$\mu=2,61$ $\sigma=2,26$ $\mu=1,03$	$\mu=13,60$ $\sigma=2,14$ $\mu=1,02$ $\tau=1,65$	$\mu=13,57$ $\sigma=2,16$ $\mu=1,03$ $\tau=13,55$
			AIC=199,3	AIC=197,1	AIC=371,5	AIC=197,7	AIC=205,9	AIC=199,5	AIC=199,8	AIC=197,1	AIC=198,4	AIC=198,4	AIC=196,7	AIC=200,4
		7	$\mu=15,66$ $\sigma=0,53$	$\mu=2,75$ $\sigma=2,21$	$\mu=2,75$	$\mu=2,75$ $\sigma=2,22$	$\mu=2,80$ $\sigma=2,36$	$\mu=15,76$ $\sigma=0,78$ $\mu=0,16$ $\tau=0,28$	$\mu=15,66$ $\sigma=0,53$ $\mu=24,16$ $\tau=2,22$	$\mu=2,75$ $\sigma=3,58$	$\mu=15,70$ $\sigma=2,23$ $\mu=1,39$	$\mu=2,75$ $\sigma=2,23$ $\mu=1,39$	$\mu=15,63$ $\sigma=2,19$ $\mu=1,64$ $\tau=11,53$	$\mu=15,70$ $\sigma=2,23$ $\mu=1,39$ $\tau=22,61$
			AIC=179,0	AIC=179,9	AIC=339,6	AIC=179,5	AIC=179,2	AIC=180,9	AIC=182,8	AIC=179,9	AIC=181,0	AIC=181,0	AIC=170,5	AIC=183,0
	MH6	9	$\mu=16,11$ $\sigma=0,08$	$\mu=2,78$ $\sigma=2,85$	$\mu=2,78$	$\mu=2,78$ $\sigma=2,85$	$\mu=2,81$ $\sigma=3,01$	$\mu=16,23$ $\sigma=0,40$ $\mu=0,30$ $\tau=0,05$	$\mu=16,11$ $\sigma=0,08$ $\mu=3,69$ $\tau=1,36$	$\mu=2,78$ $\sigma=4,24$	$\mu=16,18$ $\sigma=2,90$ $\mu=3,89$	$\mu=2,78$ $\sigma=2,90$ $\mu=3,89$	$\mu=16,17$ $\sigma=2,90$ $\mu=3,81$ $\tau=0,80$	$\mu=16,19$ $\sigma=2,90$ $\mu=3,90$ $\tau=20,61$
			AIC=97,4	AIC=98,4	AIC=266,6	AIC=98,0	AIC=96,5	AIC=100,0	AIC=100,1	AIC=98,4	AIC=98,2	AIC=98,2	AIC=100,1	AIC=100,2
		9	$\mu=16,85$ $\sigma=0,15$	$\mu=2,82$ $\sigma=2,96$	$\mu=2,82$	$\mu=2,82$ $\sigma=2,97$	$\mu=2,85$ $\sigma=3,10$	$\mu=16,91$ $\sigma=0,15$ $\mu=0,06$ $\tau=0,11$	$\mu=16,84$ $\sigma=0,14$ $\mu=14,64$ $\tau=1,98$	$\mu=2,82$ $\sigma=4,38$	$\mu=16,89$ $\sigma=2,99$ $\mu=3,02$	$\mu=2,83$ $\sigma=2,99$ $\mu=0,02$	$\mu=16,88$ $\sigma=2,98$ $\mu=2,98$ $\tau=1,18$	$\mu=16,89$ $\sigma=2,99$ $\mu=3,01$ $\tau=11,80$
			AIC=85,2	AIC=85,7	AIC=246,7	AIC=85,5	AIC=85,5	AIC=88,6	AIC=88,7	AIC=85,7	AIC=86,8	AIC=86,8	AIC=88,0	AIC=88,8
	MH7	10	$\mu=15,89$ $\sigma=0,14$	$\mu=2,76$ $\sigma=2,91$	$\mu=2,76$	$\mu=2,76$ $\sigma=2,91$	$\mu=2,79$ $\sigma=3,00$	$\mu=15,90$ $\sigma=0,07$ $\mu=0,06$ $\tau=0,09$	$\mu=15,89$ $\sigma=0,14$ $\mu=4,59$ $\tau=2,93$	$\mu=2,76$ $\sigma=4,29$	$\mu=15,90$ $\sigma=2,91$ $\mu=1,14$	$\mu=2,77$ $\sigma=2,91$ $\mu=1,14$	$\mu=15,88$ $\sigma=2,84$ $\mu=0,82$ $\tau=12,05$	$\mu=15,90$ $\sigma=2,91$ $\mu=1,14$ $\tau=60,30$
			AIC=95,8	AIC=96,0	AIC=273,1	AIC=95,9	AIC=98,0	AIC=99,4	AIC=99,8	AIC=95,9	AIC=97,8	AIC=97,8	AIC=92,1	AIC=99,8
		10	$\mu=17,55$ $\sigma=0,09$	$\mu=2,86$ $\sigma=2,94$	$\mu=2,86$	$\mu=2,86$ $\sigma=2,94$	$\mu=2,89$ $\sigma=3,09$	$\mu=17,64$ $\sigma=0,09$ $\mu=0,09$ $\tau=0,13$	$\mu=17,55$ $\sigma=0,08$ $\mu=12,54$ $\tau=1,78$	$\mu=2,86$ $\sigma=4,37$	$\mu=17,62$ $\sigma=2,98$ $\mu=3,69$	$\mu=2,87$ $\sigma=2,98$ $\mu=3,69$	$\mu=17,62$ $\sigma=2,98$ $\mu=3,84$ $\tau=0,99$	$\mu=17,62$ $\sigma=2,98$ $\mu=3,69$ $\tau=40,71$
			AIC=91,9	AIC=92,6	AIC=257,1	AIC=92,3	AIC=91,5	AIC=94,8	AIC=94,9	AIC=92,6	AIC=93,0	AIC=93,0	AIC=94,5	AIC=95,0
	NH8	11	$\mu=18,58$ $\sigma=0,17$	$\mu=2,92$ $\sigma=3,08$	$\mu=2,92$	$\mu=2,92$ $\sigma=3,08$	$\mu=2,94$ $\sigma=3,31$	$\mu=18,76$ $\sigma=0,31$ $\mu=0,24$ $\tau=0,19$	$\mu=18,58$ $\sigma=0,12$ $\mu=10,82$ $\tau=0,95$	$\mu=2,92$ $\sigma=4,54$	$\mu=18,69$ $\sigma=3,18$ $\mu=7,26$	$\mu=2,92$ $\sigma=3,18$ $\mu=7,26$	$\mu=18,56$ $\sigma=3,06$ $\mu=6,85$ $\tau=12,09$	$\mu=18,69$ $\sigma=3,18$ $\mu=7,28$ $\tau=12,14$
			AIC=78,9	AIC=79,7	AIC=237,3	AIC=79,4	AIC=75,8	AIC=80,0	AIC=79,6	AIC=79,7	AIC=78,6	AIC=78,6	AIC=74,3	AIC=80,6

Bảng 3. Kiểm tra quy luật phân bố N/H theo các hàm phân phối cho các mô hình trồng rừng keo tai tượng sản xuất gỗ nhỏ và gỗ lớn

Mô hình	Tuổi lâm phần	Các hàm phân phối													
		NO	LOGNO	EXP	GA	WEI	SHASH	JSU	IG	BCCG	BCCGo	BCPE	BCT		
Mô hình sản xuất gỗ nhỏ	MH1	6	$\mu=14.07$ $\sigma=1.04$	$\mu=2.62$ $\sigma=-1.54$	$\mu=2.64$	$\mu=2.64$ $\sigma=-1.56$	$\mu=2.72$ $\sigma=1.79$	$\mu=14.60$ $\sigma=1.30$ $\tau=0.06$ $\tau=0.48$	$\mu=14.02$ $\sigma=1.14$ $\tau=11.53$ $\tau=0.91$	$\mu=2.64$ $\sigma=-2.85$	$\mu=13.65$ $\sigma=-1.20$ $\mu=4.19$	$\mu=2.61$ $\sigma=-1.20$ $\mu=4.19$	$\mu=12.38$ $\sigma=-1.62$ $\mu=3.49$ $\tau=12.09$	$\mu=13.66$ $\sigma=-1.20$ $\mu=4.19$ $\tau=37.74$	
			AIC=141.7	AIC=144.2	AIC=206.1	AIC=143.1	AIC=140.1	AIC=142.5	AIC=143.8	AIC=144.1	AIC=141.6	AIC=141.6	AIC=103.2	AIC=143.6	
		6	$\mu=14.91$ $\sigma=1.04$	$\mu=2.68$ $\sigma=-1.56$	$\mu=2.70$	$\mu=2.70$ $\sigma=1.89$	$\mu=2.77$ $\sigma=1.89$	$\mu=15.59$ $\sigma=1.08$ $\mu=0.18$ $\tau=0.38$	$\mu=14.80$ $\sigma=1.14$ $\mu=11.00$ $\tau=0.80$	$\mu=2.70$ $\sigma=-2.90$	$\mu=14.67$ $\sigma=-1.38$ $\mu=4.50$	$\mu=2.68$ $\sigma=-1.38$ $\mu=4.50$	$\mu=15.20$ $\sigma=-1.67$ $\mu=3.88$ $\tau=1.43$	$\mu=14.71$ $\sigma=-1.39$ $\mu=4.47$ $\tau=18.14$	
	AIC=161.4	AIC=166.6	AIC=238.9	AIC=164.6	AIC=158.4	AIC=160.8	AIC=161.0	AIC=166.7	AIC=158.9	AIC=158.9	AIC=159.8	AIC=160.9			
	MH2	6	$\mu=15.23$ $\sigma=0.86$	$\mu=2.71$ $\sigma=-1.83$	$\mu=2.72$	$\mu=2.72$ $\sigma=-1.84$	$\mu=2.79$ $\sigma=1.99$	$\mu=15.33$ $\sigma=1.12$ $\mu=0.17$ $\tau=0.27$	$\mu=15.23$ $\sigma=0.86$ $\mu=22.27$ $\tau=2.49$	$\mu=2.72$ $\sigma=-3.19$	$\mu=15.25$ $\sigma=-1.86$ $\mu=1.13$	$\mu=2.72$ $\sigma=-1.86$ $\mu=1.13$	$\mu=15.09$ $\sigma=-1.85$ $\mu=0.78$ $\tau=1.87$	$\mu=15.26$ $\sigma=-1.86$ $\mu=1.14$ $\tau=25.09$	
			AIC=241.5	AIC=243.0	AIC=389.2	AIC=242.2	AIC=241.4	AIC=243.0	AIC=243.5	AIC=242.9	AIC=243.5	AIC=243.5	AIC=238.8	AIC=245.5	
		MH3	6	$\mu=14.26$ $\sigma=0.80$	$\mu=2.64$ $\sigma=-1.82$	$\mu=2.66$	$\mu=2.66$ $\sigma=-1.84$	$\mu=2.72$ $\sigma=2.02$	$\mu=14.46$ $\sigma=0.94$ $\mu=0.05$ $\tau=0.24$	$\mu=14.26$ $\sigma=0.81$ $\mu=17.88$ $\tau=1.78$	$\mu=2.66$ $\sigma=-3.14$	$\mu=14.36$ $\sigma=-1.88$ $\mu=1.55$	$\mu=2.66$ $\sigma=-1.88$ $\mu=1.55$	$\mu=14.50$ $\sigma=-1.91$ $\mu=2.12$ $\tau=1.73$	$\mu=14.36$ $\sigma=-1.88$ $\mu=1.56$ $\tau=18.32$
	AIC=190.0			AIC=192.4	AIC=309.2	AIC=191.3	AIC=189.0	AIC=192.3	AIC=193.2	AIC=192.4	AIC=191.7	AIC=191.7	AIC=189.3	AIC=193.7	
	6		$\mu=15.27$ $\sigma=1.02$	$\mu=2.71$ $\sigma=-1.63$	$\mu=2.73$	$\mu=2.73$ $\sigma=-1.66$	$\mu=2.80$ $\sigma=1.90$	$\mu=15.76$ $\sigma=1.14$ $\mu=0.04$ $\tau=0.34$	$\mu=15.26$ $\sigma=1.05$ $\mu=12.16$ $\tau=1.19$	$\mu=2.73$ $\sigma=-2.98$	$\mu=14.98$ $\sigma=-1.37$ $\mu=4.47$	$\mu=2.71$ $\sigma=-1.37$ $\mu=4.47$	$\mu=15.58$ $\sigma=-1.80$ $\mu=2.35$ $\tau=1.59$	$\mu=15.00$ $\sigma=-1.38$ $\mu=4.45$ $\tau=17.80$	
			AIC=257.2	AIC=263.7	AIC=389.5	AIC=260.9	AIC=253.9	AIC=256.7	AIC=257.6	AIC=263.8	AIC=255.5	AIC=255.5	AIC=254.2	AIC=257.6	
	6		$\mu=15.33$ $\sigma=0.77$	$\mu=2.72$ $\sigma=-1.93$	$\mu=2.73$	$\mu=2.73$ $\sigma=-1.94$	$\mu=2.79$ $\sigma=2.07$	$\mu=15.36$ $\sigma=0.49$ $\mu=0.19$ $\tau=0.14$	$\mu=15.33$ $\sigma=0.77$ $\mu=6.06$ $\tau=2.36$	$\mu=2.73$ $\sigma=-3.29$	$\mu=15.38$ $\sigma=-1.97$ $\mu=1.32$	$\mu=2.73$ $\sigma=-1.97$ $\mu=1.32$	$\mu=15.38$ $\sigma=-1.97$ $\mu=1.32$ $\tau=0.66$	$\mu=15.38$ $\sigma=-1.97$ $\mu=1.32$ $\tau=16.47$	
			AIC=200.6	AIC=202.9	AIC=337.7	AIC=201.8	AIC=201.7	AIC=204.6	AIC=204.4	AIC=202.9	AIC=202.4	AIC=202.4	AIC=204.4	AIC=204.4	
	MH4	7	$\mu=15.45$ $\sigma=1.04$	$\mu=2.72$ $\sigma=-1.55$	$\mu=2.74$	$\mu=2.74$ $\sigma=-1.61$	$\mu=2.81$ $\sigma=1.93$	$\mu=15.95$ $\sigma=0.05$ $\mu=0.65$ $\tau=0.37$	$\mu=15.46$ $\sigma=1.04$ $\mu=3.65$ $\tau=1.03$	$\mu=2.74$ $\sigma=-2.90$	$\mu=15.56$ $\sigma=-1.64$ $\mu=3.84$	$\mu=2.75$ $\sigma=-1.64$ $\mu=3.84$	$\mu=16.00$ $\sigma=-1.39$ $\mu=2.00$ $\tau=3.16$	$\mu=15.74$ $\sigma=-1.75$ $\mu=3.43$ $\tau=36.58$	
	MH5	7	$\mu=15.93$ $\sigma=0.82$	$\mu=2.76$ $\sigma=-1.92$	$\mu=2.77$	$\mu=2.77$ $\sigma=-1.93$	$\mu=2.83$ $\sigma=2.07$	$\mu=16.10$ $\sigma=0.78$	$\mu=15.93$ $\sigma=0.82$	$\mu=2.77$ $\sigma=-3.30$	$\mu=15.97$ $\sigma=-1.96$	$\mu=2.77$ $\sigma=-1.96$	$\mu=15.69$ $\sigma=-1.93$	$\mu=15.98$ $\sigma=-1.96$	
	Mô hình sản xuất gỗ lớn							$\mu=-0.08$ $\tau=0.07$	$\mu=-12.93$ $\tau=2.43$		$\mu=1.30$	$\mu=1.30$	$\mu=0.61$ $\tau=1.36$	$\mu=1.31$ $\tau=26.92$	
AIC=192.1				AIC=193.6	AIC=318.5	AIC=192.9	AIC=192.4	AIC=195.7	AIC=195.9	AIC=193.6	AIC=194.0	AIC=194.0	AIC=194.3	AIC=196.0	
$\mu=15.45$ $\sigma=0.57$				$\mu=2.73$ $\sigma=-2.17$	$\mu=2.74$	$\mu=2.74$ $\sigma=-2.17$	$\mu=2.79$ $\sigma=2.22$	$\mu=15.26$ $\sigma=0.72$ $\mu=0.26$ $\tau=0.02$	$\mu=15.45$ $\sigma=0.58$ $\mu=14.91$ $\tau=1.71$	$\mu=2.74$ $\sigma=-3.53$	$\mu=15.32$ $\sigma=-2.17$ $\mu=0.28$	$\mu=2.73$ $\sigma=-2.17$ $\mu=0.28$	$\mu=15.40$ $\sigma=-2.16$ $\mu=0.04$ $\tau=1.47$	$\mu=15.32$ $\sigma=-2.17$ $\mu=0.29$ $\tau=17.67$	
AIC=207.2				AIC=206.2	AIC=383.2	AIC=206.4	AIC=212.0	AIC=208.9	AIC=210.0	AIC=206.1	AIC=208.1	AIC=208.1	AIC=206.9	AIC=210.1	
7			$\mu=17.49$ $\sigma=0.59$	$\mu=2.86$ $\sigma=-2.23$	$\mu=2.86$	$\mu=2.86$ $\sigma=-2.25$	$\mu=2.90$ $\sigma=2.48$	$\mu=17.91$ $\sigma=0.83$ $\mu=0.03$ $\tau=0.53$	$\mu=17.43$ $\sigma=0.72$ $\mu=10.74$ $\tau=0.81$	$\mu=2.86$ $\sigma=-3.66$	$\mu=17.72$ $\sigma=-2.34$ $\mu=3.84$	$\mu=2.87$ $\sigma=-2.35$ $\mu=3.84$	$\mu=17.40$ $\sigma=-2.26$ $\mu=3.62$ $\tau=11.98$	$\mu=17.34$ $\sigma=-1.91$ $\mu=8.14$ $\tau=38.84$	
			AIC=185.0	AIC=187.8	AIC=349.5	AIC=186.8	AIC=181.2	AIC=183.0	AIC=184.5	AIC=187.8	AIC=184.5	AIC=184.5	AIC=173.7	AIC=185.1	
MH6		9	$\mu=17.97$ $\sigma=-0.05$	$\mu=2.89$ $\sigma=-2.92$	$\mu=2.89$	$\mu=2.89$ $\sigma=-2.93$	$\mu=2.91$ $\sigma=3.11$	$\mu=18.12$ $\sigma=0.03$ $\mu=0.06$ $\tau=0.27$	$\mu=17.97$ $\sigma=-0.02$ $\mu=12.62$ $\tau=1.36$	$\mu=2.89$ $\sigma=-4.37$	$\mu=18.06$ $\sigma=-2.98$ $\mu=4.47$	$\mu=2.89$ $\sigma=-2.98$ $\mu=4.47$	$\mu=18.01$ $\sigma=-2.96$ $\mu=4.01$ $\tau=1.64$	$\mu=18.06$ $\sigma=-2.98$ $\mu=4.47$ $\tau=12.98$	
			AIC=100.0	AIC=100.8	AIC=274.2	AIC=100.5	AIC=98.3	AIC=101.6	AIC=102.2	AIC=100.8	AIC=100.8	AIC=100.8	AIC=100.0	AIC=102.8	
			$\mu=17.76$ $\sigma=-0.42$	$\mu=2.88$ $\sigma=-3.29$	$\mu=2.88$	$\mu=2.88$ $\sigma=-3.29$	$\mu=2.89$ $\sigma=3.52$	$\mu=17.91$ $\sigma=-0.25$ $\mu=0.04$ $\tau=0.45$	$\mu=17.74$ $\sigma=-0.26$ $\mu=11.51$ $\tau=0.65$	$\mu=2.88$ $\sigma=-4.73$	$\mu=17.84$ $\sigma=-3.38$ $\mu=8.40$	$\mu=2.88$ $\sigma=-3.38$ $\mu=8.40$	$\mu=17.65$ $\sigma=-3.26$ $\mu=8.77$ $\tau=12.44$	$\mu=17.84$ $\sigma=-3.38$ $\mu=8.41$ $\tau=12.54$	
			AIC=67.6	AIC=68.3	AIC=250.1	AIC=68.0	AIC=64.4	AIC=67.5	AIC=67.8	AIC=68.3	AIC=67.2	AIC=67.2	AIC=60.0	AIC=69.2	
		10	$\mu=17.28$ $\sigma=-0.17$	$\mu=2.85$ $\sigma=-3.02$	$\mu=2.85$	$\mu=2.85$ $\sigma=-3.02$	$\mu=2.87$ $\sigma=3.12$	$\mu=17.29$ $\sigma=0.06$ $\mu=0.22$ $\tau=0.19$	$\mu=17.29$ $\sigma=-0.18$ $\mu=0.22$ $\tau=0.38$	$\mu=2.85$ $\sigma=-4.45$	$\mu=17.28$ $\sigma=-3.02$ $\mu=0.60$	$\mu=2.85$ $\sigma=-3.02$ $\mu=0.60$	$\mu=17.21$ $\sigma=-2.99$ $\mu=0.40$ $\tau=12.92$	$\mu=17.28$ $\sigma=-3.02$ $\mu=0.60$ $\tau=17.37$	
			AIC=93.7	AIC=93.7	AIC=279.2	AIC=93.7	AIC=95.9	AIC=96.4	AIC=97.7	AIC=93.7	AIC=95.6	AIC=95.6	AIC=87.2	AIC=97.6	
MH7		10	$\mu=18.73$ $\sigma=-0.42$	$\mu=2.93$ $\sigma=-3.34$	$\mu=2.93$	$\mu=2.93$ $\sigma=-3.34$	$\mu=2.95$ $\sigma=3.54$	$\mu=18.84$ $\sigma=-0.40$ $\mu=0.11$ $\tau=0.24$	$\mu=18.73$ $\sigma=-0.39$ $\mu=12.56$ $\tau=1.24$	$\mu=2.93$ $\sigma=-4.81$	$\mu=18.80$ $\sigma=-3.40$ $\mu=6.95$	$\mu=2.93$ $\sigma=-3.40$ $\mu=6.95$	$\mu=18.81$ $\sigma=-3.40$ $\mu=8.01$ $\tau=1.63$	$\mu=18.80$ $\sigma=-3.40$ $\mu=6.92$ $\tau=13.64$	
			AIC=69.8	AIC=70.3	AIC=261.4	AIC=70.2	AIC=67.9	AIC=71.4	AIC=71.7	AIC=70.3	AIC=70.3	AIC=70.3	AIC=69.8	AIC=72.3	
			NH8	11	$\mu=19.48$ $\sigma=0.02$	$\mu=2.97$ $\sigma=-2.93$	$\mu=2.97$	$\mu=2.97$ $\sigma=-2.94$	$\mu=2.99$ $\sigma=3.13$	$\mu=19.67$ $\sigma=0.37$ $\mu=0.13$ $\tau=0.52$	$\mu=19.47$ $\sigma=0.07$ $\mu=11.48$ $\tau=1.17$	$\mu=2.97$ $\sigma=-4.42$	$\mu=19.56$ $\sigma=-2.98$ $\mu=4.28$	$\mu=2.97$ $\sigma=-2.98$ $\mu=4.28$	$\mu=19.55$ $\sigma=-3.00$ $\mu=4.66$ $\tau=1.67$
	AIC=90.6				AIC=91.1	AIC=240.2	AIC=90.9	AIC=89.2	AIC=91.1	AIC=93.0	AIC=91.1	AIC=91.8	AIC=91.8	AIC=89.1	AIC=93.8

Kết quả phân tích phân bố N/H cũng cho xu hướng tương tự ở bảng 3. Ở mô hình gỗ nhỏ (6 - 7 năm tuổi), các phân phối linh hoạt thuộc nhóm

GAMLSS, đặc biệt là BCPE và BCCG/BCCGo, cho giá trị AIC thấp nhất hoặc xấp xỉ thấp nhất ở hầu hết các mô hình, vượt trội so với các phân

phối cổ điển (NO, LOGNO, GA, WEI). Điều này phản ánh khả năng mô phỏng tốt phân bố N/H có độ lệch phải và biến thiên lớn trong giai đoạn đầu của lâm phần. Các phân phối SHASH và JSU cũng cho kết quả khá tốt, với AIC thấp hơn nhóm phân phối truyền thống, cho thấy vai trò của tính linh hoạt trong mô hình hóa phân bố chiều cao.

Khi lâm phần chuyển sang giai đoạn gỗ lớn (9 - 11 năm tuổi), sự khác biệt AIC giữa các hàm phân phối giảm dần do cấu trúc chiều cao trở nên đồng đều hơn. Tuy nhiên, BCPE vẫn duy trì mức độ phù hợp cao nhất, trong khi WEI và GA cho kết quả ổn định và có thể chấp nhận trong thực tiễn. Xu hướng xếp hạng chung là $BCPE \approx BCCG/BCCGo > SHASH \approx JSU > WEI \approx GA > NO/LOGNO >> EXP$. Kết quả khẳng định BCPE là hàm phân phối phù hợp nhất để mô phỏng phân bố N/H rừng trồng keo tai tượng ở cả mô hình gỗ nhỏ và gỗ lớn tại tỉnh Tuyên Quang, còn Weibull và Gamma là những lựa chọn thay thế khi ưu tiên tính đơn giản và khả năng ứng dụng.

Kết quả kiểm định cho thấy, phân bố N/D và N/H của rừng trồng Keo tai tượng tại tỉnh Tuyên Quang thay đổi theo độ tuổi và trạng thái cấu trúc lâm phần, không tuân theo một dạng phân phối cố định. Trong 12 hàm phân phối được đánh giá, các phân phối linh hoạt thuộc nhóm GAMLSS, đặc biệt là BCPE và BCCG/BCCGo, cho mức độ phù hợp cao nhất hoặc gần cao nhất theo tiêu chí AIC ở hầu hết các cấp tuổi, trong khi phân phối EXP luôn cho kết quả kém phù hợp. Nhìn chung, BCPE là hàm phân phối phù hợp nhất để mô hình hóa đồng thời phân bố đường kính và chiều cao của rừng Keo tai tượng ở cả mô hình gỗ nhỏ và gỗ lớn. Trong khi đó, WEI và GA vẫn là những lựa chọn thay thế phù hợp khi ưu tiên mô hình đơn giản và dễ áp dụng. Kết quả khẳng định ưu thế của các hàm phân phối linh hoạt trong mô hình hóa cấu trúc rừng trồng Keo tai tượng qua các giai đoạn sinh trưởng.

3.3. Đánh giá mức độ phù hợp của các mô hình phân phối xác suất trong việc mô tả quy luật phân bố N/D và N/H

Kết quả kiểm định cho thấy, khả năng mô phỏng phân bố N/D của các hàm phân phối xác suất khác biệt rõ rệt. Theo các tiêu chí AIC, BIC cùng kiểm định K-S và A-D, các phân phối linh hoạt thuộc họ Box-Cox, đặc biệt là BCPE,

BCCG và BCCGo, luôn đạt mức phù hợp cao nhất hoặc gần cao nhất ở hầu hết các cấp tuổi. Ngược lại, phân phối EXP cho AIC và BIC lớn nhất, đồng thời không đạt các kiểm định K-S và A-D, cho thấy không phù hợp để mô phỏng phân bố N/D. Các phân phối WEI và GA cho kết quả khá tốt nhưng kém ổn định hơn khi đánh giá đồng thời cả bốn tiêu chí. Ưu thế của BCPE đặc biệt rõ ở giai đoạn rừng gỗ nhỏ, khi phân bố đường kính có độ lệch và đuôi phân bố lớn; ở giai đoạn gỗ lớn, mặc dù sự khác biệt giữa các hàm phân phối thu hẹp, BCPE vẫn duy trì mức độ phù hợp cao nhất.

Đối với phân bố chiều cao (N/H), kết quả kiểm định cũng cho xu hướng tương tự. Ở mô hình sản xuất gỗ nhỏ, các phân phối BCPE, BCCG và BCCGo đạt giá trị AIC, BIC thấp nhất và đáp ứng các kiểm định K-S, A-D, phản ánh khả năng mô phỏng tốt phân bố chiều cao có độ lệch và biến thiên lớn. Khi lâm phần chuyển sang giai đoạn gỗ lớn, cấu trúc chiều cao ổn định hơn nên chênh lệch giữa các hàm phân phối giảm dần; tuy nhiên, BCPE vẫn duy trì mức độ phù hợp cao nhất, đặc biệt theo kiểm định A-D. Trong khi đó, WEI và GA cho kết quả chấp nhận được, còn EXP không phù hợp trong hầu hết các trường hợp.

Nhìn chung, việc đánh giá đồng thời 12 hàm phân phối bằng các tiêu chí AIC, BIC, K-S và A-D cho thấy các phân phối linh hoạt thuộc họ Box-Cox, đặc biệt là BCPE, có mức độ phù hợp cao và ổn định nhất đối với cả phân bố N/D và N/H của rừng trồng Keo tai tượng ở cả mô hình sản xuất gỗ nhỏ và gỗ lớn. Kết quả này khẳng định, BCPE là lựa chọn phù hợp cho mô hình hóa cấu trúc lâm phần, phục vụ dự báo sinh trưởng, năng suất và định hướng chuyển hóa rừng trồng Keo tai tượng theo hướng kinh doanh gỗ lớn; trong khi WEI và GA có thể được sử dụng khi ưu tiên tính đơn giản của mô hình.

3.4. Thảo luận

Việc lựa chọn hàm phân phối xác suất phù hợp đóng vai trò then chốt trong mô hình hóa cấu trúc lâm phần, phục vụ dự báo sinh trưởng, ước tính sản lượng và hỗ trợ xây dựng các giải pháp quản lý rừng trồng theo mục tiêu kinh doanh. Đối với rừng trồng keo tai tượng, đặc điểm sinh trưởng nhanh cùng với sự biến động mạnh của cấu trúc lâm phần theo tuổi và mục đích kinh

doanh làm cho phân bố số cây theo đường kính và chiều cao không ổn định theo thời gian. Do đó, việc sử dụng một hàm phân phối cố định để mô tả cấu trúc lâm phần cho mọi giai đoạn sinh trưởng có thể không phản ánh đầy đủ đặc điểm biến độ của lâm phần. Thay vào đó, việc lựa chọn hàm phân phối cần đảm bảo khả năng mô tả linh hoạt sự thay đổi của phân bố số cây theo đường kính và chiều cao dưới tác động tổng hợp của nhiều yếu tố như điều kiện lập địa, mật độ trồng ban đầu, tuổi lâm phần và các biện pháp kỹ thuật lâm sinh. Vì vậy, việc đánh giá và so sánh hiệu quả của các hàm phân phối xác suất khác nhau là cần thiết nhằm xác định mô hình phù hợp nhất cho từng độ tuổi lâm phần và từng mục tiêu kinh doanh rừng trồng.

Kết quả ở nghiên cứu này cho thấy, ở mô hình rừng gỗ nhỏ (6 - 7 năm tuổi), cấu trúc lâm phần thường chưa ổn định, phân hóa kích thước giữa các cá thể bắt đầu hình thành, dẫn đến các dạng phân bố không đối xứng và có độ nhọn cao. Hiện tượng này phản ánh sự khác biệt về sinh trưởng ban đầu, chất lượng cây giống và điều kiện lập địa. Trong bối cảnh đó, các hàm phân phối linh hoạt như BCPE và SHASH cho mức độ phù hợp vượt trội, có khả năng điều chỉnh đồng thời độ lệch và độ nhọn, cho phép mô tả sát thực hơn cấu trúc rừng so với các hàm phân phối truyền thống (WEI và GA) vốn giả định dạng phân bố đơn giản. Cách tiếp cận này đặc biệt quan trọng đối với các lâm phần keo tai tượng định hướng chuyển hóa sang kinh doanh gỗ lớn.

Trong khi ở mô hình rừng kinh doanh gỗ lớn (≥ 9 năm tuổi), cạnh tranh ánh sáng và dinh dưỡng giữa các cá thể trở nên rõ rệt, kéo theo hiện tượng tự tỉa sinh học và hình thành những cá thể trội. Dưới tác động của tỉa thưa kỹ thuật, cấu trúc lâm phần có xu hướng ổn định hơn và phân bố đường kính, chiều cao tiệm cận tính đối xứng. Trong điều kiện này, các hàm phân phối truyền thống như WEI hoặc GA cho mức độ phù hợp khá cao. Tuy nhiên, sự tồn tại của các cá thể vượt trội hoặc nhóm cây sinh trưởng kém vẫn tạo ra biến động ở phần đuôi phân bố, đòi hỏi các hàm phân phối có mức độ linh hoạt cao hơn để đảm bảo độ chính xác của mô hình. Dựa trên các tiêu chí AIC, BIC cùng các kiểm định K-S và A-D, nghiên cứu khẳng định các hàm phân phối thuộc họ Box - Cox trong nhóm GAMLSS, đặc biệt là BCPE, thể hiện mức độ phù hợp và tính ổn định cao nhất đối với cả phân bố N/D và N/H ở hầu

hết các độ tuổi. Ngược lại, các hàm truyền thống như WEI và GA chỉ đạt mức phù hợp trung bình, trong khi phân phối EXP không phù hợp trong mọi trường hợp.

Những lập luận trên nhìn chung phù hợp với các kết quả đã được công bố trong những nghiên cứu trước tác về cấu trúc rừng trồng keo và một số loài cây nhiệt đới. Ở giai đoạn đầu sinh trưởng, phân bố đường kính và chiều cao các lâm phần keo thường gần với dạng chuẩn hoặc các dạng đối xứng đơn giản, phản ánh sự sinh trưởng tương đối đồng đều của các cá thể và mức độ cạnh tranh thấp về không gian và dinh dưỡng. Khi lâm phần bước sang giai đoạn chọn lọc sinh học, cấu trúc rừng thay đổi rõ rệt; phân bố trở nên lệch và nhọn hơn do tác động tổng hợp của hiện tượng tự tỉa thưa tự nhiên và các biện pháp can thiệp lâm sinh nhằm điều chỉnh mật độ và nâng cao chất lượng rừng. Trong bối cảnh đó, các hàm phân phối xác suất cổ điển, đặc biệt là Normal và Weibull, đã chứng minh được mức độ phù hợp cao trong việc mô hình hóa phân bố số cây theo đường kính và chiều cao. Cụ thể, Normal và Weibull được xác định là hai hàm phân phối hiệu quả đối với các lâm phần keo lai [29] và keo tai tượng [5] ở giai đoạn 4 - 8 tuổi. Kết quả tương tự cũng được ghi nhận tại khu vực Ba Vì, hai phân phối Weibull và SHASH cho thấy khả năng mô phỏng tốt phân bố N/D và N/H của rừng keo tai tượng [30]. Ngoài ra, phân phối Weibull còn được xác định là mô hình tối ưu để mô phỏng phân bố thực nghiệm N/D của rừng mỡ [31].

Ở phạm vi quốc tế, phân phối Weibull (hai và ba tham số) và Gamma được xem là các mô hình phổ biến để mô phỏng phân bố đường kính ở nhiều loại rừng trồng và rừng tự nhiên. Hàm phân phối Gamma, Weibull (2 và 3 tham số) mô phỏng tốt phân bố đường kính ở các lâm phần keo tai tượng ở nhiều độ tuổi khác nhau tại Brazil [32]. Tương tự, Weibull và Gamma là các phân phối có tính phổ quát cao trong mô phỏng phân bố đường kính rừng sồi ở giai đoạn sinh trưởng tối ưu [33]. Bên cạnh đó, hồ khả năng điều chỉnh linh hoạt các tham số, Weibull đã trở thành một trong những phân phối được sử dụng phổ biến nhất trong nghiên cứu cấu trúc rừng [34].

Tuy nhiên, điểm khác biệt và đóng góp mới của nghiên cứu này là việc áp dụng có hệ thống các hàm phân phối hiện đại thuộc họ Box-Cox

trong nhóm GAMLSS, cho phép mô phỏng linh hoạt sự biến đổi cấu trúc lâm phần theo tuổi và mô hình kinh doanh. Cách tiếp cận này góp phần nâng cao độ chính xác của các mô hình dự báo sinh trưởng, đáp ứng tốt hơn yêu cầu quản lý rừng bền vững và tối ưu hóa giá trị rừng trồng kinh doanh gỗ lớn. Việc áp dụng các hàm phân phối linh hoạt không chỉ mang ý nghĩa phương pháp luận mà còn có giá trị thực tiễn quan trọng trong quản lý rừng bền vững. Các mô hình phản ánh sát thực cấu trúc lâm phần cho phép nâng cao độ tin cậy của dự báo sinh trưởng và sản lượng, hỗ trợ ra quyết định về thời điểm và cường độ tỉa thưa, cũng như đánh giá hiệu quả của các kịch bản chuyển hóa rừng từ kinh doanh gỗ nhỏ sang gỗ lớn. Trong bối cảnh yêu cầu tối ưu hóa giá trị kinh tế và sinh thái của rừng trồng ngày càng tăng, cách tiếp cận này có thể được xem là phù hợp với xu hướng nghiên cứu và ứng dụng lâm nghiệp hiện đại.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá mức độ phù hợp của mười hai hàm phân phối xác suất trong mô phỏng phân bố đường kính (N/D) và phân bố chiều cao (N/H) của rừng trồng keo tai tượng theo hai mô hình sản xuất gỗ nhỏ và gỗ lớn tại tỉnh Tuyên Quang. Dựa trên các tiêu chí tổng hợp AIC, BIC cùng các kiểm định Kolmogorov-Smirnov và Anderson-Darling, kết quả cho thấy các hàm phân phối linh hoạt thuộc họ Box-Cox, đặc biệt là Box-Cox Power Exponential (BCPE), thể hiện mức độ phù hợp và tính ổn định cao nhất ở hầu hết các độ tuổi lâm phần. BCPE mô phỏng hiệu quả các phân bố có độ lệch và đuôi dài ở giai đoạn rừng non, đồng thời duy trì ưu thế trong rừng trưởng thành khi cấu trúc lâm phần ổn định hơn. Ngược lại, các hàm truyền thống như Weibull và Gamma chỉ đạt mức phù hợp trung bình, trong khi hàm Exponential không phù hợp trong mọi trường hợp. Kết quả này khẳng định phân phối BCPE là lựa chọn tối ưu cho mô hình hóa cấu trúc lâm phần và dự báo sinh trưởng rừng keo tai tượng theo hướng kinh doanh gỗ lớn.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này là một phần kết quả của đề tài: “Giải pháp thúc đẩy chuyển hóa rừng trồng Keo (*Acacia*) gỗ nhỏ thành rừng cung cấp gỗ lớn tại tỉnh Tuyên Quang”. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Trường Đại học Tân Trào đã hỗ trợ kinh phí

để thực hiện nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phạm Tiến Dũng, Đỗ Văn Bản, Phạm Quang Tuyền, Nguyễn Huy Hoàng, Bùi Hữu Thường, Lê Quốc Thành, Đoàn Trung Hiếu, Nguyễn Việt Cường & Trương Tất Đơ (2019). Xác định sản lượng gỗ thương phẩm của rừng trồng Keo tai tượng ở vùng Đông Bắc Bộ. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, 1(3), 86 - 94.
- [2]. Bùi Chính Nghĩa (2018). Tổng quan chính sách và cơ hội phát triển rừng trồng gỗ lớn ở Việt Nam. *Vụ Phát triển sản xuất lâm nghiệp*.
- [3]. Nguyễn Việt Hưng (2016). Nghiên cứu quy luật kết cấu lâm phần rừng trồng Keo tai tượng (*Acacia mangium*) tại Công ty Lâm nghiệp Hòa Bình. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, 2(5), 113 - 120.
- [4]. Bui Manh Hung, Nguyen Thi Bich Phuong, Le Sy Doanh & Phung The Hai (2021). Stump diameter characteristics and volume prediction for *Acacia mangium* in Ba Vi, Vietnam. *Journal of Forest Science and Technology*, 11, 28 - 37.
- [5]. Lê Đức Thắng, Đào Thị Thu Hà & Huỳnh Văn Chung (2023). Mô hình phân bố tần suất đường kính, chiều cao các lâm phần keo tai tượng (*Acacia mangium*) ở Tuyên Quang. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*, 10, 78 - 90.
- [6]. Lê Đức Thắng (2024). Mô hình phân bố tần suất đường kính và chiều cao lâm phần keo lá tràm (*Acacia auriculiformis*) tại vùng cát ven biển huyện Lệ Thủy, tỉnh Quảng Bình. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Nông nghiệp*, 8(1), 4061 - 4072.
- [7]. David M Nanang (1998). Suitability of the normal, log-normal and weibull distributions for fitting diameter distributions of neem plantations in Northern Ghana. *Forest Ecology and Management*, 103(1), 1 - 7.
- [8]. X Zhang & Y Lei (2010). A linkage among whole-stand model, individual-tree model and diameter-distribution model. *Journal of forest science*, 56(12), 600 - 608.
- [9]. M M Fallahchai, B Daneshian, M Foroughi & A Abadiz (2012). The study of some statistical distributions in order to fit *Fagus orientalis* (Beech) trees diameter in Iran's North forests. *Ecol Environ Conserv*, 18(1), 19 - 23.

- [10]. I. Kayes, J. C Deb, P Comeau & S Das (2012). Comparing normal, lognormal and Weibull distributions for fitting diameter data from Akashmoni plantations in the North-Eastern region of Bangladesh. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 74(3), 175 - 181.
- [11]. Ủy ban Nhân dân tỉnh Tuyên Quang (2021). Đề án xây dựng Tuyên Quang trở thành khu lâm nghiệp ứng dụng Công nghệ cao và trung tâm sản xuất và chế biến gỗ.
- [12]. Timothy G Gregoire & Harry T Valentine (2007). Sampling strategies for natural resources and the environment. Chapman and Hall/CRC.
- [13]. Douglas G Altman & J Martin Bland (1995). Statistics notes: The normal distribution. *Bmj*, 310(6975), 298.
- [14]. M J Fryer (1989). Lognormal Distributions: Theory and Applications. Wiley Online Library.
- [15]. Herbert C S Thom (1958). A note on the gamma distribution. *Monthly weather review*. 86(4), 117 - 122.
- [16]. Albert W Marshall & Ingram Olkin (1967). A multivariate exponential distribution. *Journal of the American Statistical Association*, 62(317), 30 - 44.
- [17]. Waloddi Weibull (1951). A statistical distribution function of wide applicability. *Journal of Applied Mechanics*, 18(3), 293 - 297.
- [18]. Teresa Fidalgo Fonseca, Carlos Pacheco Marques & Bernard R Parresol (2009). Describing maritime pine diameter distributions with Johnson's SB distribution using a new all-parameter recovery approach. *Forest Science*, 55(4), 367 - 373.
- [19]. M Chris Jones & Arthur Pewsey (2009). Sinh-arcsinh distributions. *Biometrika*, 96(4), 761 - 780.
- [20]. Göknur Giner & Gordon K. Smyth (2016). Statmod: Probability calculations for the inverse gaussian distribution. *R Journal*, 8(1), 339 - 351.
- [21]. Robert A Rigby & D Mikis Stasinopoulos (2004). Smooth centile curves for skew and kurtotic data modelled using the Box - Cox power exponential distribution. *Statistics in medicine*, 23(19), 3053 - 3076.
- [22]. Robert A Rigby, Mikis D Stasinopoulos, Gillian Z Heller & Fernanda De Bastiani (2019). Distributions for modeling location, scale, and shape: Using GAMLSS in R. Chapman and Hall/CRC.
- [23]. Nguyễn Văn Tuấn (2014). *Phân tích dữ liệu với R*. Nxb Tổng hợp Thành phố Hồ Chí Minh. 520 trang.
- [24]. George Marsaglia, Wai Wan Tsang & Jingbo Wang (2003). Evaluating Kolmogorov's distribution. *Journal of Statistical software*, 8, 1 - 4.
- [25]. Theodore W Anderson & Donald A Darling (1954). A test of goodness of fit. *Journal of the American statistical association*, 49(268), 765 - 769.
- [26]. George Marsaglia & John Marsaglia (2004). Evaluating the anderson-darling distribution. *Journal of statistical software*, 9, 1 - 5.
- [27]. Narayanaswamy Balakrishnan, Vassilly Voinov & Mikhail Stepanovich Nikulin (2013). Chi-squared goodness of fit tests with applications. *Academic Press*.
- [28]. R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>.
- [29]. Đào Thị Thu Hà & Lê Đức Thắng (2023). Đặc điểm sinh trưởng và phân bố tần suất đường kính, chiều cao các lâm phần Keo lai ở Tuyên Quang. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Lâm nghiệp*, 3, 41 - 50.
- [30]. Bui Manh Hung, Nguyen Thi Bich Phuong, Nguyen Van Quy, Nguyen Van Hop & Yusif Habib (2023). Acacia canopy structure and carbon stock in Ba Vi, Vietnam. *Journal of Forest Science*, 69(1), 21 - 32. DOI: 10.17221/46/2022-JFS.
- [31]. Vũ Nhâm (2010). Nghiên cứu chuyển hóa rừng trồng Mỡ và Sa mộc cung cấp gỗ nhỏ thành rừng cung cấp gỗ lớn tại Công ty Lâm nghiệp Yên Sơn, tỉnh Tuyên Quang và Ban Quản lý rừng Bắc Hà, tỉnh Lào Cai. Báo cáo tổng kết đề tài. Trường Đại học Lâm nghiệp.
- [32]. Carlos Roberto Sanquetta, Alexandre Behling, Ana Paula Dalla Corte, Sylvio Péllico Netto, Aurelio Lourenço Rodrigues & Augusto Arlindo Simon (2014). A model based on environmental factors for diameter distribution in black wattle in Brazil. *PLoS One*, 9(6), e100093.
- [33]. Maryam Kazempour Larsary, Kambiz Taheri Abkenar, David Pothier, Hassan Pourbabaei & Farhad Fadaie Khoshkebijari

(2016). Comparison of probability distribution functions applied to tree diameter and height of three development stages in a mixed beech (*fagus orientalis lipsky*) forest in hyrcanean region of iran. *Forestry Ideas*, 22(1), 65 - 84.

[34]. Thomas Nord-Larsen & Quang V Cao (2006). A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. *Forest ecology and Management*, 231(1-3), 218 - 225.

MODELING TREE DIAMETER AND HEIGHT DISTRIBUTIONS IN SMALL- AND LARGE-TIMBER ACACIA MANGIUM PLANTATIONS IN TUYEN QUANG, VIETNAM

Le Duc Thang¹, Dao Thi Thu Ha², Nguyen Thi Thanh³

¹ Tam Dao Research Center of Medicinal Materials,
National Institute of Medicinal Materials (NIMM)

² Tan Trao University

³ Institute of Science and Technology Development for Regions,
National Center for Technology Progress

Abstract

Modeling diameter and height frequency distributions constituted a fundamental scientific basis for analyzing stand structure and supporting sustainable forest management. This study aimed to identify the optimal probability distribution functions for modeling tree number distributions by diameter (N/D) and height (N/H) in *Acacia mangium* plantations under small- and large-timber management regimes in Tuyen Quang province, Viet Nam. The analysis was based on data collected from 15 temporary sample plots (500 m² each), representing stand ages from 6 to 11 years. Twelve probability distribution functions, including classical distributions and flexible distributions within the Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape (GAMLSS) framework, were evaluated. Model parameters were estimated using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) method and goodness-of-fit was assessed using the Kolmogorov-Smirnov and Anderson-Darling tests. The results indicated that flexible Box-Cox family distributions, particularly the Box-Cox Power Exponential (BCPE) distribution, exhibited superior goodness-of-fit and robustness in modeling both diameter and height distributions across most stand ages. The BCPE distribution effectively captured skewed and heavy-tailed distributions in young stands and maintained its performance as stand structure became more stable in mature, large-timber stands. In contrast, traditional distributions such as Weibull and Gamma showed only moderate performance, while the Exponential distribution proved unsuitable in all cases. These findings provided a robust scientific basis for growth prediction and decision-making in thinning and stand conversion, thereby enhancing the effectiveness of sustainable management of *Acacia mangium* plantations oriented toward large-timber production.

Keywords: *Diameter distribution, height distribution, Acacia mangium, probability distribution, GAMLSS, sustainable forest management.*

Ngày nhận bài: 5/3/2026

Ngày chuyển phản biện: 16/3/2026

Ngày thông qua phản biện: 23/4/2026

Ngày duyệt đăng: 21/5/2026