

Giá trị của chỉ số chất lượng xương đốt sống trên cộng hưởng từ trong đánh giá mật độ xương

Nguyễn Đăng Khoa¹, Đặng Ngọc Thạch¹, Nguyễn Đức Khang²

¹Bộ môn Chẩn đoán hình ảnh, Khoa Y, Trường Đại học Y khoa Phạm Ngọc Thạch, Thành phố Hồ Chí Minh

²Khoa Chẩn đoán hình ảnh, Bệnh viện Nhân dân 115, Thành phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt

Mục tiêu: Khảo sát giá trị của chỉ số chất lượng xương đốt sống trong đánh giá loãng xương và thiếu xương

Phương pháp: Chúng tôi thực hiện nghiên cứu hồi cứu mô tả cắt ngang khảo sát trên hình ảnh cộng hưởng từ cột sống thắt lưng không tiêm chất tương phản của người bệnh được đo mật độ xương bằng phương pháp hấp thụ tia X năng lượng kép (DXA). Nghiên cứu được thực hiện tại Bệnh viện Nhân dân 115 từ 01/01/2022 đến 28/02/2025. Đo đặc các giá trị cường độ tín hiệu các thân sống thắt lưng và dịch não tủy trên chuỗi xung T1W sagittal không tiêm thuốc tương phản, từ đó tính toán chỉ số chất lượng xương đốt sống (VBQ). Phân tích đường cong ROC giúp xác định điểm cắt của tình trạng giảm mật độ xương và loãng xương.

Kết quả: Chỉ số VBQ trung bình của các nhóm bình thường, thiếu xương, loãng xương có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê. Với điểm cắt VBQ $\geq 3,47$ cho độ nhạy 79,8%, độ đặc hiệu 70,6% trong đánh giá tình trạng giảm mật độ xương. Với điểm cắt VBQ $\geq 3,9$ cho độ nhạy 70,2%, độ đặc hiệu 78,9% trong phân biệt người bệnh có loãng xương với không có loãng xương.

Kết luận: Chỉ số VBQ có giá trị tốt trong việc ứng dụng tầm soát tình trạng loãng xương và thiếu xương ở người bệnh được chụp cộng hưởng từ cột sống thắt lưng.

Từ khóa: chỉ số chất lượng xương đốt sống; VBQ; cộng hưởng từ cột sống thắt lưng; DXA; mật độ xương; loãng xương; thiếu xương

Abstract

Value of the MRI – based Vertebral Bone Quality (VBQ) score in assessing bone mineral density

Objective: To investigate the value of the vertebral bone quality (VBQ) score in detecting osteoporosis and osteopenia.

Methods: We conducted a retrospective cross-sectional study on non-contrast lumbar spine magnetic resonance imaging (MRI) of patients who had undergone bone mineral density (BMD) measurement using dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). The study was performed at 115 People's Hospital between January 1, 2022, and February 28, 2025. Signal intensity (SI) values of the lumbar vertebral bodies and cerebrospinal fluid (CSF) were measured on T1-weighted sagittal images, and the VBQ score was calculated accordingly. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis was used to determine the optimal cutoff points for identifying osteopenia and osteoporosis.

Results: The mean VBQ scores of the normal, osteopenia, and osteoporosis groups differed significantly. A VBQ cutoff value ≥ 3.47 yielded a sensitivity of 79.8% and a specificity of 70.6% for detecting decreased BMD. A VBQ cutoff value ≥ 3.9

Ngày nhận bài:

16/10/2025

Ngày phân biện:

05/12/2025

Ngày đăng bài:

20/01/2026

Tác giả liên hệ:

Nguyễn Đăng Khoa

Email:

khoa.khoa98@gmail.com

ĐT: 0813234096

yielded a sensitivity of 70.2% and a specificity of 78.9% for differentiating patients with and without osteoporosis.

Conclusion: The VBQ score is a valuable tool for screening osteoporosis and osteopenia in patients undergoing lumbar spine MRI.

Keywords: vertebral bone quality score; VBQ; lumbar spine MRI; bone mineral density; DXA; osteoporosis; osteopenia

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Loãng xương đang dần trở thành một vấn đề sức khỏe đáng quan tâm khi dân số già trên thế giới đang ngày càng tăng. Loãng xương dẫn đến tăng nguy cơ gãy xương, gây ra những tổn thương thể chất lẫn tinh thần cho người bệnh, đồng thời tạo nên một áp lực kinh tế đáng kể cho xã hội [1-3]. Loãng xương không có triệu chứng rõ ràng, đau lưng thường chỉ xuất hiện khi gãy xương đốt sống. Loãng xương cũng được ghi nhận tăng nguy cơ biến chứng hậu phẫu và kéo dài thời gian nằm viện ở người bệnh phẫu thuật cột sống. Điều này thúc đẩy mối quan tâm về vấn đề tầm soát loãng xương ở người bệnh có nguy cơ cao. Phương pháp hấp thụ tia X năng lượng kép (Dual-energy X-ray Absorptionmetry - DXA) được xem là tiêu chuẩn vàng để chẩn đoán loãng xương. Tuy nhiên, tỷ lệ tầm soát được ghi nhận vẫn còn thấp ở các nhóm người bệnh [4].

Cộng hưởng từ (CHT) hiện nay được ứng dụng rộng rãi trong khảo sát bệnh lý cột sống nhờ các ưu điểm không xâm lấn, không sử dụng bức xạ ion hóa và có độ tương phản mô mềm tốt. Chỉ số Chất lượng xương đốt sống (Vertebral Bone Quality – VBQ) là một chỉ số dựa vào cường độ tín hiệu trên chuỗi xung T1W cộng hưởng từ cột sống thắt lưng không tiêm chất tương phản để đánh giá mật độ xương cột sống dựa vào cơ chế tăng sinh mô mỡ trong tủy xương ở người bệnh loãng xương [5, 6]. Gần đây, trên thế giới đã có các nghiên cứu khảo sát giá trị của chỉ số VBQ trong đánh giá tình trạng loãng xương, tuy nhiên, hầu hết người tham gia ở các nghiên cứu thuộc nhiều chủng tộc khác nhau, do đó, giá trị ngưỡng cắt có thể khác biệt đối với người Việt Nam. Tính đến hiện tại, chỉ số này vẫn chưa được nghiên cứu tại Việt Nam, việc tầm soát loãng xương dựa vào hình ảnh sẩn có ở người bệnh được chụp CHT cột sống thắt lưng có thể giúp bác sĩ

lâm sàng đưa ra chiến lược điều trị và dự phòng sớm hơn cho người bệnh. Do đó, chúng tôi thực hiện nghiên cứu nhằm khảo sát giá trị của chỉ số chất lượng xương đốt sống trên cộng hưởng từ trong đánh giá mật độ xương.

2. ĐỐI TƯỢNG, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là người bệnh được chụp CHT cột sống thắt lưng với những chuỗi xung thường quy không tiêm thuốc tương phản và có đo mật độ xương (MĐX) bằng phương pháp DXA cách nhau không quá 2 năm. Nghiên cứu được thực hiện tại Bệnh viện Nhân dân 115 từ 01/01/2022 đến 28/02/2025. Những trường hợp có hình ảnh không rõ ràng, người bệnh đã phẫu thuật cột sống, người bệnh mắc các bệnh lý u, viêm, ... vùng cột sống thắt lưng gây thay đổi tín hiệu thân sống, người bệnh bị gãy xẹp từ 2 thân sống mức độ trung bình trở lên theo phân loại của Genant (1993) sẽ được loại trừ ra khỏi mẫu.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

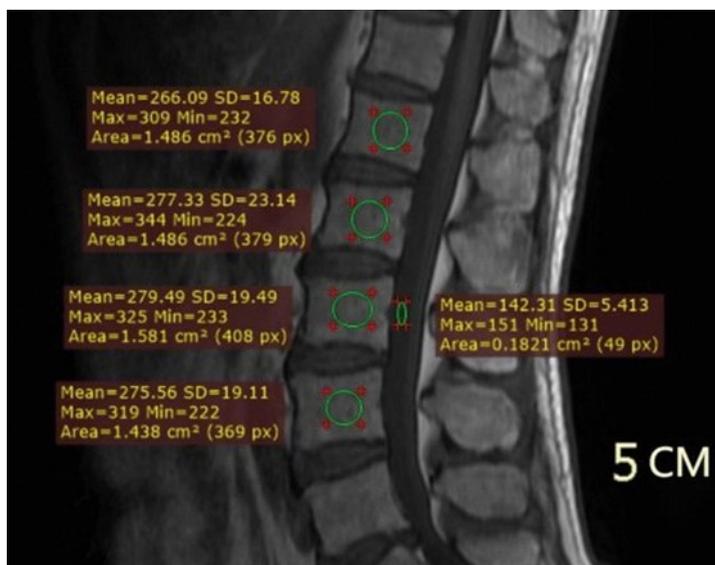
Thiết kế nghiên cứu mô tả cắt ngang có sử dụng số liệu thứ cấp. Hình ảnh được thu thập sử dụng máy CHT 1,5 Tesla của GE Healthcare và Siemens với các chuỗi xung thường quy không tiêm thuốc tương phản từ, hình ảnh được lưu trữ trên hệ thống PACS tại Bệnh viện Nhân dân 115.

Cường độ tín hiệu thân sống (SI_{L1} , SI_{L2} , SI_{L3} , SI_{L4}): Chúng tôi dựa theo phương pháp đo của tác giả Ehresman (2019) để khảo sát chỉ số VBQ, cụ thể như sau: Các giá trị cường độ tín hiệu thu nhận trên chuỗi xung T1W ở lát cắt dọc giữa. Sử dụng công cụ ROI (Region of Interest) đặt ở vùng xương xốp của thân sống. Để hạn chế sai số do đo lường, vùng đặt ROI nên đủ nhỏ để tránh các thương tổn thoái hóa Modic mà vẫn đảm bảo diện tích ROI ở các

thân sống tương đương nhau. Lần lượt ghi nhận giá trị cường độ tín hiệu của các thân sống L1, L2, L3, L4. Đối với người bệnh bị vẹo cột sống không thể khảo sát trên cùng một lát cắt dọc giữa, sử dụng các lát cắt kế cận sao cho vị trí khảo sát ở gần trung tâm thân sống nhất có thể. Trong trường hợp có một trong các thân sống kế trên bị xẹp $\geq 20\%$ chiều cao thân sống, hoặc

vùng biến đổi Modic quá lớn không đảm bảo diện tích đặt ROI, thay thế bằng cường độ tín hiệu đo ở L5.

Cường độ tín hiệu dịch não tủy (SI_{DNT}): Sử dụng công cụ ROI (Region of Interest) đặt ở vùng dịch não tủy ngang mức L3. Trong trường hợp khoang dịch não tủy ở mức L3 bị che lấp, có thể đo ở mức thân sống kế cận để thay thế.



Hình 1. Minh họa cách đặt ROI ở các thân sống thắt lưng và khoang dịch não tủy (Nguồn: *Assessing the utility of MRI-based vertebral bone quality (VBQ) for predicting lumbar pedicle screw loosening. Eur Spine J 33, 289–297 (2024)[7]*)

Chỉ số VBQ được tính như sau, dựa trên nghiên cứu của tác giả Ehresman [8]:

$$VBQ = \frac{Med SI_{L1-L4}}{SI_{DNT}}$$

Trong đó:

- + VBQ: Chỉ số chất lượng xương đốt sống
- + Med SI_{L1-L4} : Trung vị của các giá trị cường độ tín hiệu thu được ở vùng xương xốp của các thân sống
- + SI_{DNT} : Cường độ tín hiệu dịch não tủy

3. KẾT QUẢ

3.1. Đặc điểm chung

Trong thời gian thực hiện nghiên cứu từ ngày 01/01/2022 đến 28/02/2025 tại khoa Chẩn đoán hình ảnh Bệnh viện Nhân dân 115, chúng tôi thu thập được 123 trường hợp gồm 34 người có MĐX bình thường, 42 thuộc nhóm thiếu xương và 47 người bệnh loãng xương thỏa các tiêu chuẩn chọn mẫu và loại trừ. Người tham gia có độ tuổi từ 40 đến 86 tuổi, độ tuổi trung bình là $62,8 \pm 13,2$. Phân bố giới tính gồm 108 nữ (87,8%) và 15 nam (12,2%).

Bảng 1. Các giá trị đặc điểm chung của mẫu nghiên cứu

	Bình thường (T-score ≥ -1)	Thiếu xương ($-1 > \text{T-score} \geq -2,5$)	Loãng xương (T-score $< -2,5$)	p
Nữ:Nam	2,78:1	9,50:1	22,50:1	0,009
Cân nặng (kg)	60,09 \pm 7,70	57,62 \pm 8,23	52,30 \pm 6,87	< 0,001
Chiều cao (cm)	157,26 \pm 6,85	155,07 \pm 5,39	153,68 \pm 5,65	0,030
BMI (kg/m²)	24,34 \pm 3,09	23,89 \pm 2,54	22,15 \pm 2,66	0,001

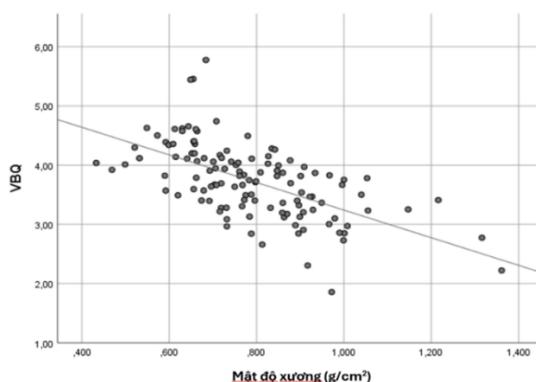
Nhóm có MĐX thấp ghi nhận tỷ lệ nữ cao hơn có ý nghĩa thống kê ($p < 0,01$). Cân nặng, chiều cao và BMI giảm dần theo mức T-score thấp hơn, đều có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê với $p < 0,05$.

3.2. Tương quan giữa chỉ số VBQ với mật độ xương

Bảng 2. Giá trị VBQ trung bình ở các nhóm mật độ xương

	Bình thường (T-score ≥ -1)	Thiếu xương ($-1 > \text{T-score} \geq -2,5$)	Loãng xương (T-score $< -2,5$)	p
VBQ	3,23 \pm 0,51	3,67 \pm 0,43	4,16 \pm 0,55	<0,001

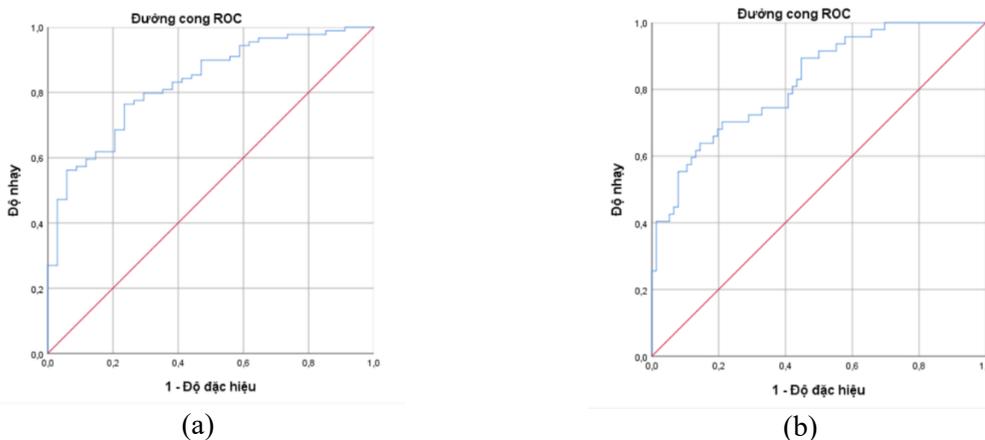
Kết quả ghi nhận ở nhóm T-score càng thấp thì chỉ số VBQ có xu hướng càng cao, sự khác biệt có ý nghĩa thống kê, $p < 0,001$.



Hình 2. Tương quan tuyến tính giữa chỉ số VBQ với mật độ xương đo bằng DXA

Phân tích tương quan Pearson cho thấy có mối tương quan nghịch giữa chỉ số VBQ với MĐX đo bằng phương pháp DXA với hệ số tương quan $r = -0,598$; $p < 0,001$.

3.3. Giá trị của chỉ số VBQ trong đánh giá tình trạng giảm mật độ xương và loãng xương



Hình 3. Đường cong ROC xác định ngưỡng VBQ đánh giá giảm mật độ xương (a) và đánh giá loãng xương (b)

Phân tích ROC cho thấy chỉ số VBQ có thể đánh giá tốt tình trạng giảm MĐX (T-score < -1,0) với AUC = 0,828 (Hình 3a). Đối với loãng xương (T-score < -2,5), VBQ cũng cho khả năng đánh giá tốt với AUC = 0,823 (Hình 3b).

Bảng 3. Đặc điểm diện tích dưới đường cong (AUC), điểm cắt, độ nhạy, độ đặc hiệu, giá trị tiên đoán dương (PPV), giá trị tiên đoán âm (NPV) của chỉ số VBQ trong đánh giá giảm mật độ xương và loãng xương

	AUC	Ngưỡng cắt	Độ nhạy	Độ đặc hiệu	PPV	NPV
T-score < -1,0	0,829	3,47	79,8%	70,6%	87,7%	57,1%
T-score < -2,5	0,823	3,90	70,2%	78,9%	67,3%	81,1%

Ngưỡng VBQ $\geq 3,47$ có thể đánh giá tình trạng giảm MĐX (T-score < -1,0) với độ nhạy 79,8%, độ đặc hiệu 70,6%, giá trị tiên đoán dương (PPV) 87,7%, giá trị tiên đoán âm (NPV) 57,1%. Ngưỡng VBQ $\geq 3,9$ có thể gợi ý phân biệt tình trạng có hay không loãng xương với độ nhạy 70,2%, độ đặc hiệu 78,9%, PPV 67,3%, NPV 81,1%.

4. BÀN LUẬN

4.1. Đặc điểm chung

Trong nghiên cứu của chúng tôi, độ tuổi trung bình của người bệnh là $62,8 \pm 13,2$ tuổi (dao động 40–86), tương đồng với nhiều nghiên cứu quốc tế. Salzmann và cs. (2022) báo cáo tuổi trung bình 62 tuổi, Özmen và cs. (2023) ghi nhận $63,4 \pm 11,1$ tuổi [9, 10].

Nghiên cứu của chúng tôi có tỉ lệ nữ cao hơn đáng kể so với nam, đặc biệt ở nhóm có MĐX thấp, cho thấy nữ giới có nguy cơ giảm MĐX cao hơn. Nghiên cứu của các tác giả khác cũng ghi nhận tương tự: nghiên cứu của tác giả Ehresman và cs. (2020) ghi nhận nữ chiếm 61,3% ở nhóm bình thường và 81,1% ở nhóm loãng xương/thiếu xương; nghiên cứu của Xingxiao Pu và cs. (2024) có nữ chiếm 77,0% ở nhóm loãng xương so với 43,7% ở nhóm không loãng xương [8, 11]. Tỉ lệ nữ cao hơn ở nhóm loãng xương được giải thích bởi sự giảm estrogen sau mãn kinh, gây mất cân bằng chuyển hóa xương và giảm khối lượng xương.

Các giá trị chiều cao, cân nặng và BMI cũng giảm dần theo ngưỡng MĐX, sự khác biệt có ý nghĩa thống kê. Các nghiên cứu trên thế giới cũng ghi nhận kết quả tương tự. Tác giả Xingxiao Pu và cs (2024) ghi nhận nhóm loãng xương có chiều cao thấp hơn nhóm không loãng xương ($159,4 \pm 6,7$ so với $164,9 \pm 7,6$ cm; $p < 0,001$) [11]. Nghiên cứu của Ehresman và cs (2020) cũng ghi nhận nhóm loãng xương/thiếu xương có BMI thấp hơn ($27,3 \pm 4,4$ so với $30,3 \pm 6,0$; $p < 0,05$) [8]. Tuy nhiên,

các thông số này được thu thập qua hồi cứu hồ sơ nên có thể không hoàn toàn chính xác với thời điểm đo MĐX.

4.2. Tương quan giữa chỉ số VBQ với mật độ xương

Nghiên cứu của chúng tôi ghi nhận có sự khác biệt có ý nghĩa thống kê về giá trị VBQ trung bình giữa ba nhóm MĐX bình thường, thiếu xương và loãng xương. Kết quả này cũng tương đồng với nghiên cứu của các tác giả Ehresman và cs (2019), Mengyang Pu và cs (2023), Xingxiao Pu và cs (2024) [8, 11, 12].

Chúng tôi cũng ghi nhận có mối tương quan tuyến tính theo hướng tương quan nghịch giữa VBQ với giá trị MĐX đo bằng DXA, $p < 0,001$, hệ số tương quan $r = -0,598$. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trên thế giới. Nghiên cứu của tác giả Emre Ozmen và cs (2022) phân tích tương quan tuyến tính giữa VBQ với các giá trị T-score cột sống thắt lưng và T-score cổ xương đùi đều ghi nhận có mối tương quan nghịch [10]. Nghiên cứu của tác giả Xingxiao Pu và cs (2024) đối chiếu với MĐX đo bằng phương pháp QCT cũng cho kết quả có sự tương quan nghịch mức độ trung bình giữa giá trị VBQ và MĐX với hệ số tương quan $r = -0,65$ [11]. Nghiên cứu khác của tác giả Wentao Lin và cs (2023) khảo sát mối tương quan tuyến tính của chỉ số VBQ với MĐX đo bằng cả hai phương pháp DXA và QCT đều cho thấy tương quan nghịch với hệ số tương quan lần lượt là -0,211 và -0,511 [13]. Các nghiên cứu hầu hết đều thống nhất về mối tương quan tuyến tính giữa

chỉ số VBQ với giá trị MĐX cũng như với trị số T-score. Điều này phù hợp với giả thuyết về quá trình thoái hóa mỡ trong tủy xương ở người bệnh loãng xương. Sự lão hóa của tế bào gốc tủy xương làm giảm số lượng tạo cốt bào, gây mất cân bằng giữa quá trình tiêu xương và tái tạo xương, dẫn đến giảm mật độ khoáng và dẫn đến loãng xương. Khi không biệt hóa thành tạo cốt bào, các tế bào này chuyển sang biệt hóa thành mỡ tủy xương, giải thích việc chỉ số VBQ tăng dần tương ứng với sự giảm MĐX.

4.3. Giá trị của chỉ số VBQ trong đánh giá tình trạng giảm mật độ xương và loãng xương

Phân tích đường cong ROC của chỉ số VBQ trong chẩn đoán loãng xương và giảm MĐX đều cho thấy khả năng phân biệt tốt với $AUC > 0,8$. Kết quả này tương tự với nghiên cứu của các tác giả khác như Mengyang Pu (2023), Wentao Lin (2023), Emre Ozmen (2023), Xingxiao Pu (2024) [10-13].

Về ngưỡng xác định tình trạng giảm MĐX, nghiên cứu của tác giả Mengyang Pu (2023) đề xuất ngưỡng 3,06 cho độ nhạy, độ đặc hiệu, PPV, NPV lần lượt là 63,6%; 87,0%; 94,2%; 41,7% [12]. Nghiên cứu của tác giả Salzmann (2022) đề xuất ngưỡng cắt 2,388 với độ nhạy 74,3%, độ đặc hiệu 57% để phân biệt người bệnh giảm MĐX với người bệnh có MĐX bình thường [9]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất ngưỡng $VBQ \geq 3,47$ để phân biệt những trường hợp giảm MĐX với MĐX bình thường với độ nhạy 79,8%, độ đặc hiệu 70,6%, PPV 87,7%, NPV 57,1%. Ngưỡng cắt này cân bằng hợp lý giữa việc phát hiện tốt những trường hợp có khả năng giảm MĐX và hạn chế những trường hợp dương tính giả.

Về ngưỡng xác định loãng xương, nghiên cứu của chúng tôi đề xuất giá trị $VBQ \geq 3,9$ để có độ nhạy 70,2%, độ đặc hiệu 78,9%, PPV 61,7%, NPV 81,1%. Nghiên cứu của tác giả Wentao Lin (2023) đề xuất ngưỡng chẩn đoán là $VBQ \geq 3,7$ với độ nhạy 48%, độ đặc hiệu 74,8%, ngưỡng cắt này cũng gần như tương đồng với nghiên cứu của chúng tôi [13]. Nghiên cứu của Emre Ozmen (2023) đề xuất ngưỡng giá trị VBQ là 2,7 để có độ nhạy 83,3%, độ đặc hiệu 44,3%, PPV 25,3%, NPV 92,2% [10]. Như vậy, có sự không thống nhất về giá trị ngưỡng cắt giữa các nghiên cứu, điều

này có thể do sự khác biệt về chủng tộc, các đặc điểm sinh lý học của quần thể nghiên cứu và tiêu chuẩn tham chiếu.

Chỉ số VBQ tuy còn mới và chưa phổ biến, tuy nhiên có tiềm năng được ứng dụng ở góc độ sàng lọc nguy cơ vì việc đo VBQ tương đối nhanh và đơn giản, có thể thực hiện trực tiếp trên hệ thống PACS. Ngoài ra, sử dụng hình ảnh CHT thường quy sẵn có giúp dễ dàng sàng lọc mà không phát sinh thêm chi phí hoặc phơi nhiễm tia xạ. Hình thức sàng lọc này đặc biệt hữu ích cho người bệnh cần phẫu thuật cột sống thắt lưng, vì phần lớn những người bệnh này có sẵn dữ liệu CHT cột sống thắt lưng trước khi phẫu thuật.

Bên cạnh đó, nghiên cứu của chúng tôi cũng còn một số hạn chế. Đầu tiên là nghiên cứu thực hiện trên mẫu gộp chung cả hai giới tính, nữ giới có nguy cơ loãng xương cao hơn nên có thể MĐX và ngưỡng chẩn đoán của nữ có sự khác biệt, tuy nhiên, vì số lượng nam giới trong mẫu quá ít nên chúng tôi không thực hiện phân tích riêng cho từng giới. Thứ hai là vì đây là nghiên cứu mô tả cắt ngang có sử dụng số liệu thứ cấp, một số thông số phải ghi nhận gián tiếp qua hồ sơ, chẳng hạn như cân nặng và chiều cao, nên có thể không hoàn toàn chính xác. Ngoài ra, khoảng cách tối đa giữa thời gian chụp DXA và CHT lên tới 2 năm, không phân biệt phương pháp nào tiến hành trước nên kết quả thu được có thể chênh lệch. Cuối cùng là chưa thật sự có tiêu chuẩn cụ thể về cách đặt ROI, việc đặt ROI còn một phần dựa vào quan sát chủ quan của người đọc, có thể ảnh hưởng đến giá trị VBQ đo được.

5. KẾT LUẬN

Chỉ số VBQ thu được trên cộng hưởng từ cột sống thắt lưng có khả năng phân loại khá tốt người bệnh có MĐX bình thường, thiếu xương và loãng xương. Điều này có thể ứng dụng giúp tăng cơ hội sàng lọc cho những người bệnh được chụp CHT cột sống thắt lưng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- 1 J. D. Adachi et al., "The impact of incident vertebral and non-vertebral fractures on health related quality of life in postmenopausal women," *BMC Musculoskeletal Disorders*,

- vol. 3, no. 1, p. 11, 2002/04/22 2002, doi: 10.1186/1471-2474-3-11.
- 2 R. Burge, B. Dawson-Hughes, D. H. Solomon, J. B. Wong, A. King, and A. Tosteson, "Incidence and Economic Burden of Osteoporosis-Related Fractures in the United States, 2005–2025," *Journal of Bone and Mineral Research*, vol. 22, no. 3, pp. 465-475, 2007, doi: 10.1359/jbmr.061113.
 - 3 Y. Shen et al., "The Global Burden of Osteoporosis, Low Bone Mass, and Its Related Fracture in 204 Countries and Territories, 1990-2019," *Frontiers in Endocrinology*, vol. 13, 2022, doi: 10.3389/fendo.2022.882241.
 - 4 R. Dell and D. Greene, "Is osteoporosis disease management cost effective?," *Curr Osteoporos Rep*, vol. 8, no. 1, pp. 49-55, Mar 2010, doi: 10.1007/s11914-010-0009-0.
 - 5 A. G. Veldhuis-Vlug and C. J. Rosen, "Clinical implications of bone marrow adiposity," *Journal of Internal Medicine*, vol. 283, no. 2, pp. 121-139, 2018, doi: 10.1111/joim.12718.
 - 6 J. Li, X. Chen, L. Lu, and X. Yu, "The relationship between bone marrow adipose tissue and bone metabolism in postmenopausal osteoporosis," *Cytokine & Growth Factor Reviews*, vol. 52, pp. 88-98, 2020/04/01/ 2020, doi: 10.1016/j.cytogfr.2020.02.003.
 - 7 Y. Gao et al., "Assessing the utility of MRI-based vertebral bone quality (VBQ) for predicting lumbar pedicle screw loosening," *European Spine Journal*, vol. 33, no. 1, pp. 289-297, 2024/01/01 2024, doi: 10.1007/s00586-023-08034-3.
 - 8 J. Ehresman et al., "Novel MRI-based score for assessment of bone density in operative spine patients," *The Spine Journal*, vol. 20, no. 4, pp. 556-562, 2020, doi: 10.1016/j.spinee.2019.10.018.
 - 9 S. N. Salzmänn et al., "Preoperative MRI-based vertebral bone quality (VBQ) score assessment in patients undergoing lumbar spinal fusion," *The Spine Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 1301-1308, 2022, doi: 10.1016/j.spinee.2022.03.006.
 - 10 E. Özmen, O. Biçer, E. Meriç, E. Circi, A. Barış, and S. Yüksel, "Vertebral bone quality score for opportunistic osteoporosis screening: a correlation and optimal threshold analysis," *European Spine Journal*, vol. 32, no. 11, pp. 3906-3911, 2023, doi: 10.1007/s00586-023-07912-0.
 - 11 X. Pu et al., "Opportunistic use of lumbar computed tomography and magnetic resonance imaging for osteoporosis screening," *Osteoporosis International*, vol. 35, no. 9, pp. 1625-1631, 2024, doi: 10.1007/s00198-024-07164-8.
 - 12 M. Pu et al., "Vertebral bone quality score provides preoperative bone density assessment for patients undergoing lumbar spine surgery: a retrospective study," (in English), *Journal of Neurosurgery: Spine*, vol. 38, no. 6, pp. 705-714, 01 Jun. 2023 2023, doi: 10.3171/2023.1.SPINE221187.
 - 13 W. Lin et al., "Assessment of bone density using the 1.5 T or 3.0 T MRI-based vertebral bone quality score in older patients undergoing spine surgery: does field strength matter?," *The Spine Journal*, vol. 23, no. 8, pp. 1172-1181, 2023, doi: 10.1016/j.spinee.2023.03.016.