Hệ thống Shinkansen Nhật Bản sử dụng công nghệ tàu bánh thép chạy trên ray. Ảnh: ST.

Lựa chọn công nghệ cho đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam: Bài toán hạ tầng và làm chủ công nghệ

GS.TS. Phạm Văn Ký, GS.TS. Bùi Tiến Thành

Trường Đại học Giao thông Vận tải

Việt Nam đang từng bước chuẩn bị cho việc triển khai tuyến đường sắt tốc độ cao (ĐSTĐC) Bắc - Nam. Tuyến đường này được định hướng áp dụng các công nghệ tiên tiến của thế giới, đồng thời phải bảo đảm phù hợp với điều kiện địa hình, khí hậu, năng lực vận hành và khả năng làm chủ công nghệ trong nước. Trên cơ sở nghiên cứu kinh nghiệm phát triển ĐSTĐC tại các quốc gia có hệ thống đường sắt hiện đại, đặc biệt là Nhật Bản và Trung Quốc, nhóm tác giả đề xuất các giải pháp về công nghệ và hạ tầng nhằm xây dựng một hệ thống ĐSTĐC hiệu quả, an toàn và bền vững cho Việt Nam.

Đặc thù kỹ thuật của tuyến đường sắt tốc độ cao Bắc - Nam

Theo định hướng quy hoạch, tuyến ĐSTĐC Bắc - Nam được thiết kế với tốc độ chạy tàu khách khoảng 350 km/h. Trong khi đó, tàu hàng dự kiến có tải trọng trục 22,5 tấn và chỉ hoạt động trong những trường hợp đặc biệt như phục vụ nhiệm vụ quốc phòng - an ninh, không chạy theo biểu đồ khai thác thường xuyên.

Đây là một cấu hình tương đối đặc biệt so với các hệ thống ĐSTĐC hiện nay trên thế giới. Hầu hết các quốc gia chỉ thiết kế tuyến ĐSTĐC 350 km/h chuyên chạy tàu khách, hoặc tách riêng hoàn toàn với tuyến vận tải hàng hóa tốc độ 120-160 km/h hoặc chạy chung tàu khách/tàu hàng với tốc độ 250/120 km/h. Vì vậy, việc thiết kế hạ tầng phải tính toán theo cách tiếp cận linh hoạt, đảm bảo vừa đáp ứng yêu cầu tốc độ cao, vừa có khả năng chịu được tải trọng lớn khi cần thiết. Đặc điểm này đòi hỏi việc lựa chọn công nghệ phải dựa trên các phương pháp thiết kế tiên tiến, đặc biệt là phân tích tải trọng theo sự kiện hiếm, kết hợp giữa tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế và các điều kiện khai thác đặc thù của Việt Nam.

Kinh nghiệm ứng dụng công nghệ đường sắt tốc độ cao trên thế giới

Sự phát triển mạnh mẽ của các hệ thống ĐSTĐC trong nhiều thập kỷ qua đã mang lại những bài học quan trọng về lựa chọn công nghệ, tổ chức vận hành và quản lý hạ tầng.

Nhật Bản là quốc gia tiên phong trên thế giới trong lĩnh vực ĐSTĐC khi đưa vào vận hành tuyến Shinkansen đầu tiên vào năm 1964, kết nối Tokyo với Osaka. Sau hơn nửa thế kỷ phát triển, Shinkansen đã trở thành biểu tượng của công nghệ giao thông hiện đại với độ an toàn, độ chính xác và hiệu quả vận hành rất cao.

Một trong những điểm nổi bật trong mô hình của Nhật Bản là việc thiết kế hệ thống ĐSTĐC hoàn toàn tách biệt với mạng lưới đường sắt truyền thống. Điều này cho phép các đoàn tàu có thể vận hành ở tốc độ cao ổn định mà không bị ảnh hưởng bởi tàu hàng hoặc tàu khách tốc độ thấp. Tuyến đường được xây dựng với tiêu chuẩn kỹ thuật nghiêm ngặt, bán kính đường cong lớn và phần lớn được xây dựng trên cầu cạn hoặc trong hầm nhằm đảm bảo độ ổn định khi tàu chạy ở tốc độ cao.

Về công nghệ hạ tầng, Nhật Bản áp dụng rộng rãi kết cấu đường ray không ballast (slab track). So với kết cấu đường ray truyền thống sử dụng đá ballast, công nghệ này giúp duy trì độ chính xác hình học của đường ray trong thời gian dài, giảm nhu cầu bảo trì và đặc biệt phù hợp với vận hành ở tốc độ cao. Bên cạnh đó, các công nghệ bê tông dự ứng lực và kỹ thuật thi công cầu cạn tiên tiến cũng được ứng dụng rộng rãi để đảm bảo độ ổn định của nền đường.

Một yếu tố quan trọng khác là hệ thống điều khiển và tín hiệu. Nhật Bản đã phát triển hệ thống điều khiển tàu tự động (ATC) và trung tâm điều hành giao thông hiện đại cho phép giám sát và điều khiển toàn bộ hoạt động của mạng lưới Shinkansen theo thời gian thực. Nhờ các công nghệ này, khoảng cách giữa các đoàn tàu có thể được tối ưu hóa, đồng thời vẫn đảm bảo mức độ an toàn tuyệt đối.

Nhật Bản cũng đặc biệt chú trọng ứng dụng công nghệ số trong bảo trì và quản lý hạ tầng. Các đoàn tàu kiểm tra chuyên dụng được trang bị hệ thống cảm biến và thiết bị đo lường hiện đại để liên tục kiểm tra tình trạng đường ray không khe nối, ghi, cầu, hầm, nền đường và hệ thống điện. Dữ liệu thu thập được phân tích bằng các công cụ số nhằm phát hiện sớm các dấu hiệu kết cấu, thiết bị xuống cấp hoặc vượt ngưỡng, từ đó triển khai bảo trì dự báo (chủ động) trước khi xảy ra sự cố.

Ngoài ra, Nhật Bản còn phát triển nhiều công nghệ giảm tiếng ồn, giảm rung động và tối ưu khí động học cho đoàn tàu. Thiết kế mũi tàu đặc trưng của Shinkansen không chỉ giúp giảm lực cản không khí, mà còn góp phần hạn chế hiện tượng "bùng nổ áp suất" khi tàu đi qua hầm ở tốc độ cao.

Những kinh nghiệm này cho thấy sự thành công của Nhật Bản không chỉ nằm ở việc xây dựng hạ tầng hiện đại, mà còn ở hệ sinh thái công nghệ toàn diện, bao gồm thiết kế, vận hành, bảo trì, quản lý an toàn và độ tin cậy.

Nếu Nhật Bản là quốc gia tiên phong thì Trung Quốc lại là nước có tốc độ phát triển mạng lưới ĐSTĐC nhanh nhất thế giới. Chỉ trong khoảng hai thập kỷ, Trung Quốc đã xây dựng hệ thống China Railway High-speed với tổng chiều dài hàng chục nghìn km, trở thành mạng lưới ĐSTĐC lớn nhất toàn cầu.

Thành công của Trung Quốc phần lớn dựa trên chiến lược kết hợp tiếp thu, cải tiến, phát triển công nghệ quốc tế và nội địa hóa công nghệ. Trong giai đoạn đầu, Trung Quốc hợp tác với nhiều quốc gia có kinh nghiệm trong lĩnh vực ĐSTĐC như Nhật Bản, Đức và Pháp để tiếp nhận công nghệ đoàn tàu, hệ

thống tín hiệu và kết cấu hạ tầng. Sau đó, thông qua quá trình nghiên cứu, cải tiến và chuẩn hóa, Trung Quốc đã phát triển các dòng tàu và công nghệ riêng phù hợp với điều kiện trong nước.

Một điểm đáng chú ý trong mô hình của Trung Quốc là việc ứng dụng mạnh mẽ công nghệ số và tự động hóa trong quản lý vận hành. Hệ thống điều hành giao thông được xây dựng trên nền tảng dữ liệu lớn, cho phép theo dõi tình trạng khai thác của hàng nghìn chuyến tàu mỗi ngày. Các thuật toán tối ưu hóa được sử dụng để xây dựng biểu đồ chạy tàu, điều chỉnh tốc độ và phân bổ nguồn lực nhằm nâng cao hiệu quả vận hành.

Trong lĩnh vực bảo trì hạ tầng, Trung Quốc đã triển khai nhiều công nghệ tiên tiến như hệ thống cảm biến Internet vạn vật (IoT) lắp đặt dọc tuyến đường, robot kiểm tra cầu và hầm, cũng như các đoàn tàu kiểm tra tự động. Những công nghệ này giúp thu thập dữ liệu liên tục theo thời gian thực về tình trạng hạ tầng, từ đó xây dựng mô hình bảo trì dự báo dựa trên trí tuệ nhân tạo (AI).

Ngoài ra, Trung Quốc cũng đầu tư mạnh vào nghiên cứu và phát triển công nghệ vật liệu mới cho ĐSTĐC. Các loại bê tông cường độ cao, ray thép chất lượng cao và vật liệu giảm rung đã được ứng dụng rộng rãi nhằm nâng cao tuổi thọ hạ tầng và giảm chi phí bảo trì.

Một điểm khác biệt trong mô hình của Trung Quốc là khả năng triển khai dự án với quy mô lớn và tốc độ nhanh. Điều này đạt được nhờ hệ thống tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất, quy trình thiết kế, thi công được chuẩn hóa và năng lực sản xuất thiết bị trong nước rất mạnh.

Kinh nghiệm của Trung Quốc cho thấy, việc phát triển ĐSTĐC không chỉ phụ thuộc vào công nghệ mà còn đòi hỏi chiến lược phát triển công nghiệp hỗ trợ và nâng cao năng lực nội địa hóa tiến đến hoàn toàn tự chủ công nghệ hiện đại.

Những kinh nghiệm này cho thấy một điểm chung: hệ thống ĐSTĐC hiện đại không chỉ phụ thuộc vào kết cấu hạ tầng mà còn gắn liền với các nền tảng công nghệ số trong quản lý, vận hành và bảo trì.

Các yêu cầu công nghệ đối với hạ tầng

Để bảo đảm khai thác ổn định ở tốc độ cao, hệ thống hạ tầng cần đáp ứng nhiều yêu cầu kỹ thuật nghiêm ngặt.

Trước hết là kết cấu nền đường và cầu. Tuyến ĐSTĐC phải có độ ổn định rất cao nhằm khắc phục tuyệt đối dao động cộng hưởng khi tàu chạy ở tốc độ cao. Vì vậy, các giải pháp công nghệ như nền đường gia cố bằng vật liệu mới, cầu cạn bê tông dự ứng lực và hệ thống móng sâu thường được áp dụng rộng rãi.

Thứ hai là kết cấu đường ray. Kinh nghiệm quốc tế cho thấy, đường không ballast dạng slab track đang trở thành xu hướng phổ biến do khả năng đảm bảo duy trì độ chính xác hình học cao, truyền lực động xuống kết cấu bên dưới ít hơn, giảm rung chấn, giữ ray hàn liền (CWR) không bị biến dạng ngang vượt ngưỡng và chi phí bảo trì thấp trong vòng đời khai thác. Tuy nhiên, việc lựa chọn loại kết cấu cụ thể cần cân nhắc đến điều kiện khí hậu nhiệt đới, đặc điểm địa chất, khu vực nhạy cảm tiếng ồn và rung chấn của Việt Nam.

Thứ ba là hệ thống điện khí hóa. ĐSTĐC yêu cầu nguồn điện ổn định, thường sử dụng hệ thống điện xoay chiều 25 kV-50 Hz. Hệ thống cấp điện phải được thiết kế với mức độ dự phòng cao, đồng thời tích hợp các công nghệ giám sát thông minh nhằm phát hiện sớm các sự cố trong quá trình vận hành.

Ứng dụng công nghệ số trong quản lý và vận hành

Một trong những xu hướng quan trọng của ngành đường sắt hiện đại là ứng dụng mạnh mẽ công nghệ số trong toàn bộ vòng đời hệ thống. Các công nghệ như IoT, AI và dữ liệu lớn (Big Data) đang được nhiều quốc gia áp dụng để giám sát tình trạng hạ tầng và đoàn tàu. Thông qua các cảm biến lắp đặt trên đường ray, cầu, hầm và đoàn tàu, hệ thống có thể thu thập dữ liệu liên tục về rung động, nhiệt độ, biến dạng và tải trọng. Những dữ liệu này sau đó được phân tích bằng các thuật toán thông minh nhằm dự đoán nguy cơ hư hỏng và lập kế hoạch bảo trì chủ động. Phương pháp bảo trì dự báo giúp giảm đáng kể chi phí sửa chữa, đồng thời hạn chế gián đoạn trong khai thác.

Xây dựng hệ thống giám sát điều hành giao thông đường sắt tập trung đóng vai trò cực kỳ quan trọng. Trung tâm điều hành như bộ não có thể quản lý toàn bộ hoạt động của mạng lưới thông qua các nền tảng số, giúp tối ưu hóa biểu đồ chạy tàu và năng lực thông qua của tuyến.

Định hướng lựa chọn công nghệ cho Việt Nam

Đối với Việt Nam, việc lựa chọn công nghệ cho tuyến ĐSTĐC Bắc - Nam cần tuân thủ một số nguyên tắc quan trọng.

Phiên họp lần thứ năm Ban Chỉ đạo các công trình trọng điểm, dự án quan trọng quốc gia lĩnh vực đường sắt. Ảnh: ST.

Trước hết là tính đồng bộ: Các thành phần của hệ thống như hạ tầng (đường ray, cầu hầm, thông tin tín hiệu), đoàn tàu và hệ thống điện phải được thiết kế theo cùng một chuẩn công nghệ để đảm bảo khả năng tương thích và an toàn vận hành.

Thứ hai là khả năng tiếp nhận và làm chủ công nghệ: Trong quá trình triển khai dự án, cần có chiến lược chuyển giao công nghệ rõ ràng, từng bước nâng cao năng lực thiết kế, thi công và bảo trì của các doanh nghiệp trong nước.

Thứ ba là tính linh hoạt trong khai thác: Hệ thống cần được thiết kế sao cho có thể mở rộng trong tương lai, đồng thời thích ứng với sự phát triển của các công nghệ mới.

Từ các phân tích trên, chúng tôi đề xuất một số giải pháp công nghệ cho hệ thống ĐSTĐC tại Việt Nam như sau:

Trước hết, cần ưu tiên áp dụng kết cấu đường không ballast trên các đoạn tuyến chính nhằm đảm bảo độ ổn định và giảm chi phí bảo trì dài hạn. Song song với đó là việc sử dụng các công nghệ thi công hiện đại để nâng cao chất lượng xây dựng.

Thứ hai, hệ thống tín hiệu và điều khiển nên áp dụng các tiêu chuẩn quốc tế tiên tiến, cho phép tự động hóa ở mức cao trong vận hành. Điều này giúp đảm bảo an toàn khi tàu chạy ở tốc độ cao và mật độ khai thác cao.

Thứ ba, cần xây dựng nền tảng quản lý hạ tầng dựa trên dữ liệu số. Việc phát triển hệ thống giám sát thông minh và bảo trì dự báo sẽ giúp nâng cao hiệu quả vận hành, đồng thời giảm chi phí trong suốt vòng đời dự án.

Cuối cùng, việc phát triển nguồn nhân lực công nghệ cao cho ngành đường sắt là yếu tố then chốt. Các chương trình đào tạo chuyên sâu về kỹ thuật ĐSTĐC, công nghệ điều khiển và quản lý hạ tầng cần được triển khai đồng bộ với quá trình xây dựng dự án.

*
* *

Việc xây dựng tuyến ĐSTĐC Bắc - Nam không chỉ là dự án giao thông quy mô lớn mà còn là cơ hội để Việt Nam tiếp cận và làm chủ các công nghệ tiên tiến của thế giới. Kinh nghiệm từ các quốc gia có hệ thống đường sắt phát triển cho thấy, thành công của một tuyến ĐSTĐC phụ thuộc rất lớn vào việc lựa chọn công nghệ phù hợp, tổ chức vận hành hiệu quả và ứng dụng mạnh mẽ các nền tảng công nghệ số. Nếu có chiến lược đúng đắn trong lựa chọn công nghệ, kết hợp với quá trình chuyển giao và nội địa hóa phù hợp, Việt Nam hoàn toàn có thể xây dựng một hệ thống ĐSTĐC hiện đại, an toàn và bền vững, góp phần quan trọng trong việc thúc đẩy phát triển kinh tế - xã hội trong nhiều thập kỷ tới ✍