

วิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น

Sample Size Determination Techniques for Structural Equation Modeling: SEM

รังสรรค์ โฉมยา^{1*} สมบัติ ท้ายเรือคำ² และ เสกสรรค์ ทองคำบรรจง³

Rungson Chomeya^{1*} Sombat Tayraukham² and Sakesan Tongkhambanchong³

(Received: July 4, 2021; Revised: July 28, 2021; Accepted: July 30, 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีจุดประสงค์ที่สำคัญคือ (1) เพื่อให้ผู้อ่านได้รู้จักและทำความเข้าใจเกี่ยวกับเทคนิคการกำหนดขนาดตัวอย่างของการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น (2) เพื่อให้ผู้อ่านได้เห็นแนวทางวิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างของการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นแบบคลาสสิก และ (3) เพื่อให้ผู้อ่านได้เห็นแนวทางวิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างของการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นด้วยโปรแกรมออนไลน์ และจากตารางที่สังเคราะห์ขึ้น บทความนี้ผู้เขียนใช้วิธีการสังเคราะห์ (synthesis) เอกสารทางวิชาการ หนังสือ ตำราและบทความที่ว่าการกำหนดขนาดตัวอย่างของการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น โดยในตอนต้นจะนำเสนอแนวคิดเกี่ยวกับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น ตอนกลางของบทความเป็นวิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างด้วยหลักและวิธีการแบบดั้งเดิม โปรแกรมออนไลน์ และตารางที่สังเคราะห์ขึ้น ตอนท้ายของบทความเป็นการสรุปให้ผู้อ่านได้พิจารณาไปใช้ในการดำเนินการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น เพื่อให้การวิจัยมีคุณภาพและน่าเชื่อถือ ตลอดจนพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านวิจัยให้เพิ่มพูนมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ขนาดตัวอย่างการวิจัย วิธีวิทยาการวิจัย หลักการของสถิติพหุคูณ ตัวแปรแฝง ตัวแปรที่สังเกตได้

¹ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาจิตวิทยาการศึกษาและการแนะแนว คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

² รองศาสตราจารย์ ภาควิชาหลักสูตร การสอนและการเรียนรู้คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

³ อาจารย์ ภาควิชาวิจัยและจิตวิทยาประยุกต์ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

¹ Associate Professor, Department of Educational Psychology and Guidance, Faculty of Education, Mahasarakham University

² Associate Professor, Department of Curriculum, Instruction and Learning, Faculty of Education, Chiang Mai University

³ Lecturer, Department of Research and Applied Psychology, Faculty of Education, Burapha University

* Corresponding Author E-mail: rungson.c@msu.ac.th

Abstract

The main objectives of this article are: (1) for readers to know and gain better understanding about the sample size determination techniques for Structural Equation Modeling (SEM) analysis; (2) for readers to see guidelines on how to determine the sample size for the classic Structural Equation Modeling analysis; and 3) for readers to see guidelines on sample size determination for the Structural Equation Modeling using an online program and the synthesized sample size table. In this article, the author employed synthesis of academic documents, books, textbooks and articles on sample size determination for Structural Equation Modeling analysis. At the beginning, this article provides concepts on approaches to Structural Equation Modeling analysis. In the middle portion of the article, it presents the Structural Equation Modeling sample size determination using traditional principles, an online program and the synthesized sample size table. The last part of the article deals with the summary for readers to consider and make their own choice in implementation of the sample size determination for Structural Equation Model analysis to obtain better research quality and reliability as well as to develop more body of knowledge in research.

Keywords: research sample size; research methodology; multivariate statistics principles; latent variables; observed variables

การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น

การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น (Structural Equation Modeling : SEM) เป็นตัวเลือกที่ยอดนิยมมากขึ้นสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติในการวิจัยเชิงปริมาณ เนื่องจากช่วยให้นักวิจัยสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน ในขณะที่ต้องคำนึงถึงข้อผิดพลาดในการวัดตัวแปรแฝงที่เกิดขึ้นในระหว่างการศึกษาไปพร้อมกัน (Kline, 2015) แม้ว่าการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นจะมีข้อได้เปรียบที่ดีในการใช้แบบจำลองในการอธิบายปรากฏการณ์ แต่ความซับซ้อนของการวิเคราะห์อาจเป็นอุปสรรคและข้อผิดพลาดที่สำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับนิสิต นักศึกษาหรือนักวิจัยมือใหม่ หนึ่งในปัญหาที่ยุ้งยากที่สุดที่นักวิจัยต้องเผชิญเมื่อใช้การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น คือการกำหนดขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์อย่างง่าย เช่น การทดสอบค่าที (t-test) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) การวิเคราะห์ความแปรปรวนร่วม (ANCOVA) ตลอดจนการวิเคราะห์ถดถอย (Regression Analysis) มีตำราทางการวิจัยมากมายที่นำเสนอหลักการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์เหล่านี้ ซึ่งช่วยให้นักวิจัยสามารถคำนวณ

ขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมโดยใช้ตัวบ่งชี้ (indicator) ในการพิจารณาเพียงไม่กี่อย่าง เช่น อำนาจของการทดสอบระดับความสำคัญและขนาดอิทธิพล (effect size) แต่สำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น มีวิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างที่มีความยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าหลายเท่าตัว

การกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น

การวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น วิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างมักจะถูกพิจารณาในแง่ของจำนวนตัวแปรที่สังเกตได้ สำหรับข้อมูลที่กระจายโดยปกติ Bentler and Chou (1987) แนะนำอัตราส่วนขั้นต่ำเพียง 5 รายต่อตัวแปรก็เพียงพอเมื่อตัวแปรแฝงที่มีตัวแปรสังเกตได้หลายตัว ส่วนกฎหัวแม่มือหรือกฎนิ้วมือสิบนิ้ว (rule of thumb) ที่นำเสนอว่าการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น ขนาดของตัวอย่างที่ยอมรับได้คือ 10 รายต่อตัวแปรบ่งชี้ (indicator variable) หรือ ตัวแปรสังเกตได้ (observe variable) หนึ่งตัวใช้ในกรณีที่จำนวนตัวอย่างมีจำนวนเพียงพอสำหรับเกณฑ์ต่ำสุดที่เป็นไปได้สำหรับการวิเคราะห์ นักวิจัยส่วนใหญ่ยอมรับว่าการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น ต้องการขนาดตัวอย่างขนาดใหญ่ นักวิจัยจำนวนมากใช้เกณฑ์ขั้นต่ำคือ 300 รายขึ้นไป (Comrey & Lee, 2013; Tabachnick & Fidell, 2012) แต่ข้อสรุปนี้อาจจะไม่เหมาะสมกับนักวิเคราะห์ส่วนใหญ่ เนื่องจากไม่มีการคำนวณหรือวิธีการที่ถูกต้องที่ได้รับการยอมรับในระดับสากลสำหรับการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น นักวิจัยและนักวิชาการสถิติบางคนแนะนำให้ใช้อัตราส่วนจำนวนตัวอย่างต่อค่าพารามิเตอร์โดยประมาณ (N : Q rule; number of cases (N) to the number of model parameters that require statistical estimates (Q).) เป็นแนวทางโดยเฉพาะ Kline (2015) แนะนำว่าอัตราส่วน N : Q ควรเป็น 20 ต่อ 1 หรือ 20 ราย (participants) สำหรับแต่ละพารามิเตอร์โดยประมาณในแบบจำลอง ซึ่งผู้เชี่ยวชาญบางส่วนแนะนำว่าอัตราส่วน N : Q สามารถกำหนดต่ำลงได้ถึง 10 ต่อ 1 (Schreiber et al., 2006) หรือ 5 ต่อ 1 ก็ยังสามารถทำได้ (Bentler & Chou, 1987) เห็นได้ชัดว่ามีความแปรปรวนและความไม่แน่นอนมากมายในการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น แม้จะเป็นแนวทางที่เสนอโดยนักวิชาการที่เชี่ยวชาญด้านการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นก็ตาม

การกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นยังขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรสังเกตได้ต่อตัวแปรแฝง (Marsh, et al., 1998; Marsh & Hau, 1999) ตามที่นักวิจัยบางคนเสนอว่าตัวแปรสังเกตได้ที่มีจำนวนมากขึ้นต่อปัจจัยอาจขัดแย้งตัวอย่างที่มีขนาดเล็กได้ และขนาดตัวอย่างที่ใหญ่กว่าอาจขัดแย้งตัวแปรสังเกตได้บางอย่างต่อปัจจัยได้เช่นเดียวกัน ให้พิจารณาว่าขนาดตัวอย่างของ $n=50$ ราย เพียงพอสำหรับโมเดลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน (Confirmatory Factor Analysis : CFA) ที่มีตัวแปรสังเกตได้ 6-12 ตัวแปรต่อองค์ประกอบ ในขณะที่นักวิชาการส่วนหนึ่งเสนอว่าขนาดตัวอย่างควรเป็นอย่างน้อย $n=100$ ราย สำหรับโมเดลการวิเคราะห์ที่มีตัวแปรสังเกตได้ 3 - 4 ตัวแปรต่อองค์ประกอบ (Boomsma, 1985; Marsh & Hau,

1999) อย่างไรก็ตามหากมีเพียง 2 ตัวแปรสังเกตได้ต้ององค์ประกอบในโมเดลการวิเคราะห์องค์ประกอบยืนยันขนาดตัวอย่างที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ต้องมีอย่างน้อยไม่ต่ำกว่า 400 ราย (Kline, 2015)

ในทางสถิติความแปรปรวนร่วมนั้นมีความเสถียรน้อยกว่าเมื่อประมาณค่าจากตัวอย่างขนาดเล็ก ดังนั้นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงเส้นขนาดของตัวอย่างขึ้นอยู่กับความแปรปรวนร่วม การประมาณพารามิเตอร์และการทดสอบความตรงของโมเดล (ความกลมกลืน) ด้วยสถิติไคกำลังสองก็มีความอ่อนไหวต่อขนาดตัวอย่างมากเช่นกัน ดังนั้นนักสถิติเสนอว่า การวิเคราะห์ความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงเส้น จะใช้ตัวอย่างเช่นเดียวกับการวิเคราะห์องค์ประกอบ ซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่ใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่ (Tabachnic & Fidell, 2007 cited in Velicer & Fava, 1998) อย่างไรก็ตามพบว่า ในการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงสำรวจ (exploratory factor analysis) ขนาดของน้ำหนักองค์ประกอบ (factor loading) จำนวนตัวแปรและขนาดของตัวอย่างเป็นองค์ประกอบสำคัญในการได้แบบจำลององค์ประกอบที่ดี หลักการนี้ใช้กับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงเส้น (SEM) ก็ได้เช่นเดียวกัน แบบจำลองที่ดีนั้นค่าการวัดค่าพารามิเตอร์ได้ยากและตัวแปรที่เชื่อถือได้อาจมีค่าน้อยลง แม้ว่า การวิเคราะห์ความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงเส้นจะเป็นเทคนิคในการวิเคราะห์ทางสถิติที่ใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่ แต่เนื่องจากเทคนิคการทดสอบทางสถิติแบบใหม่ ๆ ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นในยุคหลังๆ ยอมรับให้มีการวิเคราะห์ความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงเส้นได้เมื่อมีตัวอย่างน้อยที่สุดไม่ต่ำกว่า 60 ตัวอย่างขึ้นไป (Bentler & Yuan, 1999)

Thakkar (2020) เสนอว่าขนาดตัวอย่างที่จะต้องพิจารณาในการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น (SEM) นั้นมีความจำเป็น เนื่องจากการวิเคราะห์ SEM มีขนาดใหญ่และยังมีความสามารถในการจัดการข้อมูลที่ซับซ้อนของความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลหลายตัวแปรดังนั้นขนาดตัวอย่างจึงเป็นสิ่งสำคัญ มีสองสมมติฐานยอดนิยมนำมาใช้ในกรณีของขนาดตัวอย่างที่เป็นไปได้ก็คือควรมีอย่างน้อย 50 หรือมากกว่า 200 หรือมากกว่าแปดเท่าของจำนวนตัวแปรที่ใช้ในโมเดลการวิเคราะห์ นอกจากนี้ยังมีข้อเสนอของ Hair et al. (2019) เสนอเงื่อนไขการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น ไว้ในตาราง 1 ดังนี้

ตาราง 1 แสดงแนวทางการกำหนดขนาดตัวอย่างตามวิธีการของ Hair et al. (2019)

ข้อเสนอ	เงื่อนไข / ข้อพิจารณาใน SEM โมเดล	ขนาดตัวอย่าง
ข้อเสนอนที่ 1	- โครงสร้างมีห้าองค์ประกอบหรือน้อยกว่า - ในแต่ละองค์ประกอบมีตัวแปรสังเกตได้มากกว่า 3 ตัว - ค่า item communalities เท่ากับ 0.6 หรือสูงกว่า	100 - 150 ราย
ข้อเสนอนที่ 2	- โครงสร้างมีเจ็ดองค์ประกอบหรือน้อยกว่า - ค่า item communalities อยู่ระหว่าง 0.45-0.55	200 ราย
ข้อเสนอนที่ 3	- โครงสร้างมีน้อยกว่าเจ็ดองค์ประกอบ	มากกว่า 300 ราย

ตาราง 1 (ต่อ)

ข้อเสนอ	เงื่อนไข / ข้อพิจารณาใน SEM โมเดล	ขนาดตัวอย่าง
	- ค่า item communalities มีค่าน้อยกว่า .45 และ/หรือ มีหลายค่าต่ำกว่าที่ยอมรับได้ (under-identified) 3 ค่า	
ข้อเสนอที่ 4	- โครงสร้างมีหลายองค์ประกอบ - ค่า item communalities บางค่าต่ำกว่าที่ยอมรับได้ (under-identified) และ/หรือองค์ประกอบมีตัวแปรสังเกตได้น้อยกว่า 3 ตัว	มากกว่า 500 ราย

อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์แบบจำลองสมการความสัมพันธ์โครงสร้างเชิงเส้น (Structural Equation Modeling : SEM) จัดเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ที่อาศัยขนาดตัวอย่างขนาดใหญ่ (Hair, et al., 2019; Härdle & Simar, 2019) จึงไม่อาจใช้วิธีการกำหนดขนาดตัวอย่างเหมือนงานวิจัยเชิงสำรวจโดยทั่ว ๆ ไป การวิเคราะห์องค์ประกอบ Tabachnick and Fidell (2012) ผู้วิจัยต้องพิจารณาเงื่อนไขต่างๆ อย่างละเอียดประกอบการพิจารณาการกำหนดขนาดตัวอย่างของการวิเคราะห์ด้วย ข้อเสนอของ Comrey and Lee ที่เสนอไว้ในปี 1992 (Tabachnick & Fidell, 2007) ระบุว่า การวิเคราะห์ในลักษณะนี้ ขนาดตัวอย่าง 50 รายถือว่าใช้ไม่ได้ 100 รายขึ้นไปก็ยังไม่น่าเชื่อถือ แต่ถ้า 200 รายขึ้นไปก็พอเชื่อถือได้ แต่ถ้าได้ตัวอย่าง 300 รายขึ้นไปถือว่าดี หรือถ้าตัวอย่าง 500 รายขึ้นไปถือว่าดีมาก แต่ถ้าต้องการผลการวิเคราะห์องค์ประกอบที่ยอดเยี่ยมที่สุดจะต้องใช้ตัวอย่าง 1000 รายขึ้นไป อย่างไรก็ตามข้อเสนอของ MacCallum et al. (Tabachnick & Fidell, 2014 cited in MacCallum et al., 1999) ระบุว่า การวิเคราะห์องค์ประกอบที่ให้ผลการวิเคราะห์ที่น่าเชื่อถือต้องใช้ตัวอย่างมากกว่า 500 รายขึ้นไป นอกจากนี้ Denis (2021) เสนอว่าขนาดตัวอย่าง 300 ขึ้นไปถือเป็นความจำเป็นขั้นต่ำสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ แต่ถ้าในกรณีที่ค่า communalities ต่ำมากๆ และองค์ประกอบที่กำหนดไว้ไม่ดีพอ (factors are poorly determined) ต้องใช้ขนาดตัวอย่าง 500 รายขึ้นไป ซึ่งในทฤษฎีผู้เขียนเห็นว่าแนวทางหลังเป็นตัวเลือกที่ดีกว่าในการกำหนดขนาดตัวอย่างที่ดี

คอมพิวเตอร์กับการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น

ในปัจจุบัน ด้วยวิวัฒนาการของเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์ และระบบการประมวลผลออนไลน์ ทำให้มีการแก้ปัญหาของการคำนวณขนาดตัวอย่างของการวิจัย ด้วยการสร้างโปรแกรมการคำนวณขนาดตัวอย่างออนไลน์ขึ้นมาให้กับนักวิจัยต่างๆ ได้เข้าไปใช้ในงาน เพื่อให้ง่าย สะดวกและมีความถูกต้องแม่นยำในการกำหนดขนาดตัวอย่างมากขึ้น ทำให้การประมาณค่าตัวอย่างสำหรับการวิจัยมีความละเอียดมากยิ่งขึ้นสามารถให้จำนวนตัวอย่างในทุกช่วงค่าของประชากร และสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งในปัจจุบันมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการกำหนดขนาดตัวอย่างและการเผยแพร่ผ่านช่องทางออนไลน์เพื่อให้ นักวิจัยนำไปประยุกต์ใช้งานอยู่เป็นจำนวน

มากมายหลายโปรแกรม แต่ในบทความนี้ผู้เขียนจะขอแนะนำตัวอย่างโปรแกรมการคำนวณขนาดตัวอย่างออนไลน์ตามวิธีการของโซเปอร์ ที่นักวิจัยนิยมใช้ในการอ้างอิง เพื่อให้ผู้อ่านได้มองเห็นภาพในเบื้องต้น ดังนี้

โปรแกรมการคำนวณขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น [analyticscalculators.com](https://www.analyticscalculators.com) และ <https://www.danielsoper.com> (Soper, 2022) แนะนำโดย Dr.Daniel Soper ศาสตราจารย์ด้าน Information Systems & Decision Sciences จากมหาวิทยาลัย California State University ประเทศสหรัฐ ได้ทำการสร้างโปรแกรมสำหรับการคำนวณหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น โดยนำเสนอโปรแกรมในลักษณะออนไลน์ผ่านเว็บไซต์ [analyticscalculators.com](https://www.analyticscalculators.com) โดยโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์หาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น นี้มีชื่อว่า Structural Equation Model Sample Size Calculator ซึ่งนักวิจัยทั่วไปสามารถที่จะเข้าไปเลือกใช้ โดยเข้าไปที่หน้าเว็บ ตาม URL ที่ระบุ (Soper, 2022) (Soper, 2022b) เช่น Analyticscalculators URL : <https://www.analyticscalculators.com/calculator.aspx?id=89> หรือ danielsoper.com URL : <https://www.danielsoper.com/statcalc/calculator.aspx?id=89>

ยกตัวอย่าง สำหรับเว็บ [analyticscalculators.com](https://www.analyticscalculators.com) เมื่อเข้าสู่หน้าเว็บตามที่อยู่ที่ระบุข้างต้น จะพบหน้าจอตั้งภาพประกอบ 1 ซึ่งนักวิจัยจะต้องทำการตอบคำถามหรือป้อนข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของแบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นที่ผู้วิจัยต้องการศึกษา ว่ามีคุณลักษณะเบื้องต้นอย่างไร โดยจะต้องลงรายละเอียดข้อมูลในเรื่องต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. Expected effect size (ค่าอิทธิพลที่ผู้วิจัยคาดหวัง) ขนาดของค่าอิทธิพลที่สมบูรณ์ที่สุดขั้นต่ำที่ผู้วิจัยคาดการณ์ไว้โดยมีค่าที่ให้กำหนดได้ 3 ระดับ คือ 0.1 (ระดับต่ำ) 0.3 (ระดับปานกลาง) และ 0.5 (ระดับมาก)
2. Latent variables (จำนวนตัวแปรแฝง) ตามจำนวนตัวแปรที่ผู้วิจัยศึกษา
3. Observed variables (จำนวนตัวแปรที่สังเกตได้) ตามจำนวนตัวแปรที่ผู้วิจัยศึกษา
4. p-value (ค่าความคลาดเคลื่อน หรือระดับนัยสำคัญ) ค่าที่กำหนดจะต้องต่ำกว่าหรือเท่ากับ .05 เท่านั้น
5. Statistical power (ค่าอำนาจของการทดสอบ) ค่าที่กำหนดจะต้องสูงกว่าหรือเท่ากับ .80 ขึ้นไปเท่านั้น

The screenshot shows the 'Analytics Calculators' website with a dark blue header. The main content area is titled 'Structural Equation Model Sample Size Calculator'. It includes a description of the calculator's purpose and a form with the following inputs: Expected effect size (0.3), Latent variables (3), Observed variables (12), p-value (0.05), and Statistical power (0.8). A 'Calculate!' button is at the bottom of the form.

ภาพ 2 แสดงโปรแกรมการคำนวณขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้าง
เชิงเส้น analyticscalculators.com (Soper, 2022)

ตัวอย่างเช่น ผู้วิจัยกำหนดค่า Expected effect size เท่ากับ 0.3 (ระดับปานกลาง) จำนวน Latent variables เท่ากับ 6 จำนวน Observed variables เท่ากับ 24 ค่า p-value เท่ากับ .05 ค่า Statistical power เท่ากับ .95 โปรแกรมจะกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ไว้ 3 ระดับ เพื่อให้ผู้วิจัยตัดสินใจ คือ minimum sample size to detect effect (ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำที่จะตรวจพบเอฟเฟกต์) 236 ราย minimum sample size for model structure (ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำสำหรับโครงสร้างของแบบจำลอง) เท่ากับ 100 ราย และ recommended minimum sample size (ขนาดตัวอย่างขั้นต่ำที่โปรแกรมแนะนำให้ใช้) คือ 236 ราย

ดังภาพ 3

Minimum sample size to detect effect: 236

Minimum sample size for model structure: 100

Recommended minimum sample size: 236

ภาพ 3 แสดงผลการคำนวณขนาดตัวอย่างจากโปรแกรมการคำนวณขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์
แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น analyticscalculators.com (Soper, 2022)

แต่ถ้าผู้วิจัยกำหนดค่าอิทธิพลที่ผู้วิจัยคาดหวัง เป็น 0.5 (ระดับมาก) โปรแกรมจะกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ ไว้ 3 ระดับ เพื่อให้ผู้วิจัยตัดสินใจ คือ Minimum sample size to detect effect ไม่ต่ำกว่า 58 ราย Minimum sample size for model structure ไม่ต่ำกว่า 100 ราย และ Recommended minimum sample size ไม่ต่ำกว่า 100 ราย สำหรับเว็บ danielsoper.com เมื่อเข้าสู่หน้าเว็บตามที่อยู่ที่ระบุข้างต้น จะพบหน้าจอ ดังภาพ 4

The screenshot shows the 'Free Statistics Calculators' website (version 4.0). The main heading is 'CALCULATOR: A-PRIORI SAMPLE SIZE FOR STRUCTURAL EQUATION MODELS'. Below this, there is a description of the calculator's function: 'This calculator will compute the sample size required for a study that uses a structural equation model (SEM), given the number of observed and latent variables in the model, the anticipated effect size, and the desired probability and statistical power levels. The calculator will return both the minimum sample size required to detect the specified effect, and the minimum sample size required given the structural complexity of the model.' Below the description, there is a prompt: 'Please enter the necessary parameter values, and then click 'Calculate''. The input fields are: 'Anticipated effect size: 0.1', 'Desired statistical power level: 0.8', 'Number of latent variables: 2', 'Number of observed variables: 10', and 'Probability level: 0.05'. A 'Calculate!' button is located below the input fields. At the bottom, there is a 'Related Resources' section with links to 'x² Formulas', 'References', 'Related Calculators', and a 'Search' bar.

ภาพ 4 แสดงโปรแกรมการคำนวณขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น danielsoper.com (Soper, 2022b)

จากภาพ 4 นักวิจัยจะต้องทำการตอบคำถามหรือป้อนข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะของแบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นที่ผู้วิจัยต้องการศึกษา ว่ามีคุณลักษณะเบื้องต้นอย่างไร โดยจะต้องลงรายละเอียดข้อมูลในเรื่องต่าง ๆ (Soper, 2022b) ดังต่อไปนี้

1. anticipated effect size: (ค่าอิทธิพลที่ผู้วิจัยคาดหวัง) ขนาดของค่าอิทธิพลที่สมบูรณ์ที่สุดขั้นต่ำที่ผู้วิจัยคาดการณ์ไว้ โดยมีค่าที่ให้กำหนดได้ 3 ระดับ คือ 0.1 (ระดับต่ำ) 0.3 (ระดับปานกลาง) และ 0.5 (ระดับมาก)
2. desired statistical power level (ค่าอำนาจของการทดสอบ) ค่าที่กำหนดจะต้องสูงกว่าหรือเท่ากับ .80 ขึ้นไปเท่านั้น

3. number of latent variables (จำนวนตัวแปรแฝง) ตามจำนวนตัวแปรที่ผู้วิจัยศึกษา
4. number of observed variables (จำนวนตัวแปรที่สังเกตได้) ตามจำนวนตัวแปรที่ผู้วิจัยศึกษา
5. probability level (ค่าความคลาดเคลื่อน หรือระดับนัยสำคัญ) ค่าที่กำหนดจะต้องต่ำกว่าหรือเท่ากับ .05 เท่านั้น

การกำหนดขนาดตัวอย่างตามวิธีการของ Soper จะต้องคำนวณขนาดตัวอย่างจากแบบจำลองทั้งหมดในครั้งเดียว ในแบบจำลองในภาพรวม จะไม่คำนวณขนาดตัวอย่างที่ละองค์ประกอบ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนแบบที่หนึ่งมีค่ามากเกินไป เช่น คำนวณขนาดตัวอย่างที่ละองค์ประกอบ จำนวน 3 องค์ประกอบ จำนวน 3 ครั้ง จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนแบบแอลฟาเป็น 0.15 แทนที่จะเป็น 0.05 และการกำหนดค่าอิทธิพลที่ผู้วิจัยคาดหวังไม่ควรจะตั้งค่าไว้สูง ควรจะตั้งค่าอิทธิพลที่ผู้วิจัยคาดหวังไว้ต่ำ ๆ เพื่อป้องกันความผิดพลาดที่อาจจะมาจากการคาดหมายของข้อมูลไม่เป็นไปตามที่ผู้วิจัยคาดหวังไว้

ส่วนผลการวิเคราะห์ก็จะขนาดตัวอย่างที่เท่ากันระหว่างทั้งสองเว็บไซต์ ซึ่งการเลือกใช้โปรแกรมออนไลน์กำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น ในทฤษฎีของผู้เขียนเห็นว่านักวิจัยควรกำหนดให้ค่าอำนาจการทดสอบมีค่าสูงไว้ก่อน ทั้งนี้เนื่องจาก สิ่งแรกและสำคัญที่สุดของอำนาจการทดสอบ (Power of Test) คือ ความน่าจะเป็น อำนาจของการทดสอบคือความน่าจะเป็นที่เราจะปฏิเสธสมมติฐานที่เป็นกลาง (null hypothesis) ที่ผู้วิจัยกำหนดไว้หากสมมติฐานที่เป็นกลางนั้นเป็นเท็จ ไม่จริง ลวง ซึ่งมีค่าเท่ากับ $1 - \beta$ (1 ลบด้วยค่าความคลาดเคลื่อนแบบที่ II หรือความคลาดเคลื่อนแบบเบต้า : ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการที่เรายอมรับสมมติฐานที่เป็นกลางทั้ง ๆ ที่มันเป็นเท็จ) หากสมมติฐานที่เป็นกลางนั้นเป็นจริง เราก็ไม่จำเป็นต้องมาคำนึงว่าการวิเคราะห์จะต้องมีอำนาจของการทดสอบเท่าใด (การทบทวนวรรณกรรมอย่างเข้มข้นจะช่วยลดโอกาสที่สมมติฐานที่เป็นกลางนั้นจะเป็นสมมติฐานลวงหรือเท็จ) แม้เราจะยอมรับสมมติฐานที่เป็นกลางนั้นก็ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายใดๆ ได้ อำนาจของการทดสอบเราอาจจะมองในแง่ที่ว่า "มันคือความไวของการทดสอบทางสถิติเพื่อตรวจจับเท็จหรือการหลอกลวงของสมมติฐานที่เป็นกลาง" หากการทดสอบไม่มีความไวต่อการปฏิเสธสมมติฐานที่เป็นกลาง (ในแง่ของสมมติฐานทางเลือก) เราจะไม่ทำการตรวจสอบการปฏิเสธสมมติฐานดังกล่าว นั่น แต่ถ้าหากการทดสอบมีความไวต่อทดสอบเราจะสามารถวิเคราะห์ผลและอนุมานสมมติฐานทางเลือกได้อย่างถูกต้องเพื่อตอบประเด็นคำถามของการวิจัยได้อย่างแม่นยำมากที่สุด (Denis, 2021) การกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นด้วยโปรแกรมออนไลน์นี้ผู้เขียนขอเรียกสั้น ๆ ว่าวิธีการของโซเปอร์ (Soper method) (Soper, 2022; Soper, 2022b) นักวิจัยจะต้องรายงานคุณสมบัติต่าง ๆ ทั้ง 5 ประการในรายงานการวิจัยด้วยเพื่อให้ผู้อ่านได้พิจารณา ได้แก่ จำนวนตัวแปรที่สังเกตได้ จำนวนตัวแปรแฝง ค่าอิทธิพลที่ผู้วิจัยคาดหวัง ค่าอำนาจของการทดสอบ และค่าความคลาดเคลื่อน หรือระดับนัยสำคัญ พร้อมด้วยขนาดตัวอย่างทั้ง 3 ระดับที่ได้จากผลการคำนวณ

อย่างไรก็ตามการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น มีความซับซ้อน และยังไม่มีมาตรฐานที่แน่นอนที่สุดสำหรับการกำหนดขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ และกฎที่กำหนดไว้ไม่สามารถใช้ได้ในทุกสถานการณ์ของการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น (Muthén & Muthén, 2002) ผู้วิจัยที่ทำการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นอาจจะต้องพิจารณาจากหลายๆ ปัจจัยประกอบกันในการกำหนดขนาดตัวอย่างที่มีความเหมาะสม เพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความสมบูรณ์และน่าเชื่อถือได้มากที่สุด

วิธีการจำลองแบบมอนติคาโล (Monte Carlo simulation method) กำลังกลายเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากขึ้นในการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น เพื่อการอธิบายในเชิงลึก (Wolf et al., 2013; Wang & Wang, 2020) ในระยะสั้นวิธีการจำลองแบบมอนติคาโลช่วยให้นักวิจัยสร้างแบบจำลองตามข้อกำหนดที่แน่นอนของผู้วิจัย จากนั้นทดสอบแบบจำลองในชุดข้อมูลที่มาจากการสุ่มกับตัวอย่างที่มีขนาดแตกต่างกันนับพัน ซึ่งวิธีการนี้จะช่วยให้นักวิจัยเห็นค่าอิทธิพลในแบบจำลอง ที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง (อำนาจของการทดสอบ) ข้อได้เปรียบของวิธีการนี้คือช่วยให้นักวิจัยสามารถกำหนดขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมสำหรับแบบจำลองที่จะดำเนินการวิเคราะห์ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการจำลองแบบมอนติคาโลนี้ต้องใช้ความเชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ข้อมูลในระดับสูงในของผู้วิเคราะห์ ซอฟต์แวร์ทางสถิติที่มีความเฉพาะเจาะจงมาก เช่น โปรแกรม Mplus จึงจะสามารถที่จะดำเนินการได้อย่างถูกต้อง ซึ่งวิธีการนี้คาดว่าจะได้รับความนิยมมากยิ่งขึ้นในอนาคต (Barbu & Zhu, 2020; Mitchell, 2017; Rubinstein & Kroese, 2016) นอกจากนี้ยังมีวิธีการประมาณขนาดตัวอย่างแบบซาโตรรา-ซาริส (Satorra-Saris method) ที่อาศัยความสามารถในการประมวลผลของซอฟต์แวร์อย่าง โปรแกรม SAS และ Mplus เป็นต้น (Wang & Wang, 2020)

นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้นำเสนอแนวทางการพิจารณาการกำหนดขนาดตัวอย่างจากตารางการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น (RSS sample size table for Structural Equation Modeling: SEM) ที่ได้ทำการสังเคราะห์ขึ้น โดยสรุปจากแนวคิด Christensen, Johnson, and Turner (2014); Patten and Newhart (2018); Creative Research Systems (2022); Tabachnick and Fidell (2007); Tabachnick, Fidell, and Ullman (2018); Denis (2021) ซึ่งผู้เขียนได้ใช้วิธีการประมวลองค์ความรู้ และเงื่อนไขต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการพิจารณากำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์โดยอิงพื้นฐานเทคนิคการวิเคราะห์ที่จำเป็นจะต้องใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่มาประกอบในการพิจารณา โดยคาดหวังว่าจะเป็นทางเลือกให้ผู้วิจัยนำไปใช้ในการพิจารณาหรืออ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น ดังตาราง 2

ตาราง 2 แสดงขนาดตัวอย่างสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นที่เป็นไปได้

ตารางการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น (RSS sample size table for Structural Equation Modeling : SEM)									
N	n	N	n	N	n	N	n	Value	n
60	52	700	248	4,000	351	40,000	381	For large sample size analysis technique	
70	59	800	260	5,000	357	50,000	381		
80	66	900	269	6,000	361	60,000	382	Very poor	50
90	73	1,000	278	7,000	364	75,000	382	Poor	100
100	80	1,100	285	8,000	367	80,000	382	Fair	200
200	132	1,200	291	9,000	368	90,000	383	Good	300
300	169	1,400	302	10,000	370	100,000	383	Very good	500
400	196	1,500	306	15,000	375	200,000	383	Excellent	1,000
500	217	2,000	322	20,000	377	300,000	383	Exceptional	1,200
600	234	3,000	341	30,000	379	400,000	383	Profound	1,500

หมายเหตุ Large sample size analysis technique ได้แก่ Factor analysis, Structural Equation Modeling and other

การพิจารณาเงื่อนไขทั้งหมดนี้ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นและการสรุปผลการวิจัยมีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ถูกต้องแม่นยำ ปราศจากข้อสงสัยในการอธิบายปรากฏการณ์ตามแบบจำลองที่ได้จากการวิเคราะห์ ข้อเสนอต่างๆ ที่นำเสนอในบทความนี้ล้วนเป็นข้อเสนอที่ได้รับการยอมรับสำหรับการวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์และสังคมศาสตร์ในระดับสากล จึงน่าจะเป็นแนวทางที่ดีและเป็นทางเลือกสำหรับนักวิจัยที่จะต้องทำการพิจารณากำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ผลการวิจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น ท้ายที่สุดปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อขนาดตัวอย่างที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่นักวิจัยต้องคำนึงถึงคือ จริยธรรมของการวิจัย โดยเฉพาะถ้ากำหนดขนาดตัวอย่างขนาดใหญ่เกินไป อาจเกิดการใช้ตัวอย่างเข้าร่วมในการวิจัยเพิ่มเติมโดยไม่จำเป็นซึ่งอาจเป็นประเด็นทางจรรยาบรรณของการวิจัย ในทางกลับกัน หากตัวอย่างมีขนาดเล็กเกินไปก็ไม่น่าเป็นไปได้ที่จะทำให้การวิจัยประสบความสำเร็จ นักวิจัยต้องคำนึงถึงนัยสำคัญและหลักการทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบกันด้วยเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในขอบเขตของผลลัพธ์ที่คาดหวังในทางสถิติ (Gravetter, 2018) นักวิจัยต้องพิจารณาทุกเงื่อนไขประกอบกันอย่างรอบคอบที่สุดเท่าที่จะทำได้เพื่อลดความผิดพลาดต่างๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นในกระบวนการของการวิจัย

สรุปและข้อเสนอเพื่อการประยุกต์ใช้

เนื่องจากการกำหนดขนาดตัวอย่างของการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นสามารถทำได้ในหลายแนวทางดังที่ผู้เขียนได้นำเสนอมาทั้งที่การใช้โปรแกรมออนไลน์ การใช้ตารางสำเร็จรูป และจากตารางการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับเทคนิคการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น (RSS sample size table for Structural Equation Modeling: SEM) ที่ผู้เขียนได้สังเคราะห์ขึ้น แม้ว่าการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นจะมีหลักการง่ายๆ โดยทั่วไปว่า ประมาณ 10-20 เท่าของค่าพารามิเตอร์ที่นับจากเมทริกซ์ทั้ง 8 ในการวิเคราะห์ของแบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้น (SEM model) หรือตามวิธีการของโซเปอร์ (Soper method) ท้ายสุดในกลุ่มนักวิจัยทางพฤติกรรมศาสตร์ก็ยังคงมีความเห็นตรงกันว่า ไม่ว่าจะใช้วิธีการใดในการกำหนดขนาดตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นก็จะต้องพิจารณาในเงื่อนไข 2 ประการ คือ ประการแรกเงื่อนไขสำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ของเทคนิควิธีการทางสถิติต่างๆ เช่น EFA, CFA, SEM, MSEM ฯลฯ และประการที่สองคือเงื่อนไขการเป็นตัวแทนของประชากร (truly representativeness) ด้วยขนาดของตัวอย่างที่เพียงพอสำหรับการสรุปอ้างอิง (minimum requirement) ไปยังประชากรที่ศึกษา ถ้าพิจารณาผ่านในเงื่อนไขแรก ก็ต้องมาดูความพอเพียงขั้นต่ำในเงื่อนไขที่สองประกอบกันด้วย เพราะการกำหนดขนาดตัวอย่างของการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นสามารถทำได้ในหลายแนวทาง และมีข้อพิจารณาตามหลักการทางสถิติ หลักการวิจัยตลอดจนหลักการวิเคราะห์อยู่หลายประการ ซึ่งผู้วิจัยจะต้องทำการพิจารณาว่า ธรรมชาติของการวิเคราะห์แบบจำลองสมการโครงสร้างเชิงเส้นที่ดำเนินการอยู่นั้นมีลักษณะเป็นการวิเคราะห์ที่มีขอบเขตของตัวแปรมากนักแค่ไหน ค่าอิทธิพลที่ผู้วิจัยคาดหวังหรือขนาดของค่าอิทธิพลที่สมบูรณ์ที่สุดขั้นต่ำที่ผู้วิจัยคาดการณ์ไว้มีค่าเท่าไร จำนวนตัวแปรแฝงที่ต้องการศึกษามีมากน้อยเพียงใด รวมถึงจำนวนตัวแปรที่สังเกตได้ที่สามารถวัดได้อย่างเที่ยงตรง ค่าความคลาดเคลื่อน หรือระดับนัยสำคัญที่ยอมรับได้ ตลอดจนอำนาจของการทดสอบทางสถิติ ทั้งนี้ต้องพิจารณาถึงงบประมาณมีมากน้อยเท่าไร และอื่นๆ อีกหลายประการ เพราะการออกแบบตัวอย่าง (sampling design) เป็นเรื่องที่สำคัญที่สุดในการออกแบบการวิจัย (research design) ที่จะทำให้งานวิจัยแต่ละเรื่องมีความเฉพาะเจาะจงและมีคุณภาพ

References

- Barbu, A., & Zhu, S-C. (2020). *Monte Carlo Methods*. Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Bentler, P. M., & Chou, C. P. (1987). Practical issues in structural modeling. *Sociological Methods & Research*, 16(1), 78-117.
- Bentler, P. M., & Yuan, K.-H. (1999). Structural equation modeling with small samples: Test statistics. *Multivariate Behavioral Research*, 34(2), 181- 197.

- Boomsma, A. (1985). Nonconvergence, improper solutions, and starting values in LISREL maximum likelihood estimation. *Psychometrika*, 52, 345–370.
- Christensen, L. B., Johnson, R. B., & Turner, L. A. (2014). *Research Methods, Design, and Analysis*. Pearson International Publishing.
- Creative Research Systems. (2022). *Sample Size Calculator*. Creative Research Systems. <https://www.surveysystem.com/sscalc.htm>
- Denis, D. J. (2021). *Applied Univariate, Bivariate, and Multivariate Statistics Understanding Statistics for Social and Natural Scientists, With Applications in SPSS and R*. John Wiley & Sons.
- Gravetter, F. J. (2018). *Research Methods for the Behavioral Sciences*. Cengage Learning.
- Kline, R. B. (2015). *Principles and Practice of Structural Equation Modeling* (4th ed.). The Guilford Press.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis*. Hampshire, Cengage Learning EMEA.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2012). *Multivariate data analysis* (6th ed.). Pearson.
- Marsh, H. W., & Hau, K.T. (1999). *Confirmatory factor analysis: strategies for small sample sizes*. In: *Statistical Strategies for Small Sample Size*. Sage Publications.
- Marsh, H. W., Hau, K.-T., Balla, J. R., and Grayson, D. (1998). Is more ever too much? The number of indicators per factor in confirmatory factor analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 33, 181–220.
- Mitchell, F. J. (2017). *Monte Carlo Simulation Methods, Assessment and Applications*. Nova Science Publishers, Inc.
- Muthén, L. K., & Muthén, B. (2002). How to use a Monte Carlo study to decide on sample size and determine power. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 4, 599–620.
- Patten, M. L., & Newhart, M. (2018). *Understanding Research Methods*. Taylor and Francis.
- Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2016). *Simulation and the Monte Carlo Method*, Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.

- Schreiber, J. B., Nora, A., Stage, F. K., Barlow, E. A., & King, J. (2006). Reporting structural equation modeling and confirmatory factor analysis results: A review. *The Journal of Educational Research*, 99(6), 323-338.
- Soper, D. S. (2022). *Structural Equation Model Sample Size Calculator*.
<https://www.analyticscalculators.com/calculator.aspx?id=89>.
- Soper, D. S. (2022b). *A-priori Sample Size Calculator for Structural Equation Models*.
<http://www.danielsoper.com/statcalc>
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2007). *Using Multivariate Statistics* (5th ed.). Pearson International Publishing.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2012). *Using Multivariate Statistics* (6th ed.). Pearson International Publishing.
- Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2014). *Using Multivariate Statistics* Pearson New International Edition. Pearson International Publishing.
- Tabachnick, B. G., Fidell, L. S., & Ullman, J. B. (2018). *Using Multivariate Statistics* (7th ed.). Pearson International Publishing.
- Thakkar, J. J. (2020). *Structural Equation Modelling Application for Research and Practice (With Amos and R)*. Springer Nature.
- Wang, J., & Wang, X. (2020). *Structural equation modeling applications using Mplus*. Wiley, John Wiley & Sons Ltd.
- Wolf, E. J., Harrington, K. M., Clark, S. L., & Miller, M. W. (2013). Sample size requirements for structural equation models: An evaluation of power, bias, and solution propriety. *Educational and Psychological Measurement*, 73(6), 913-934.